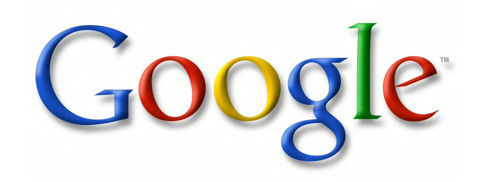
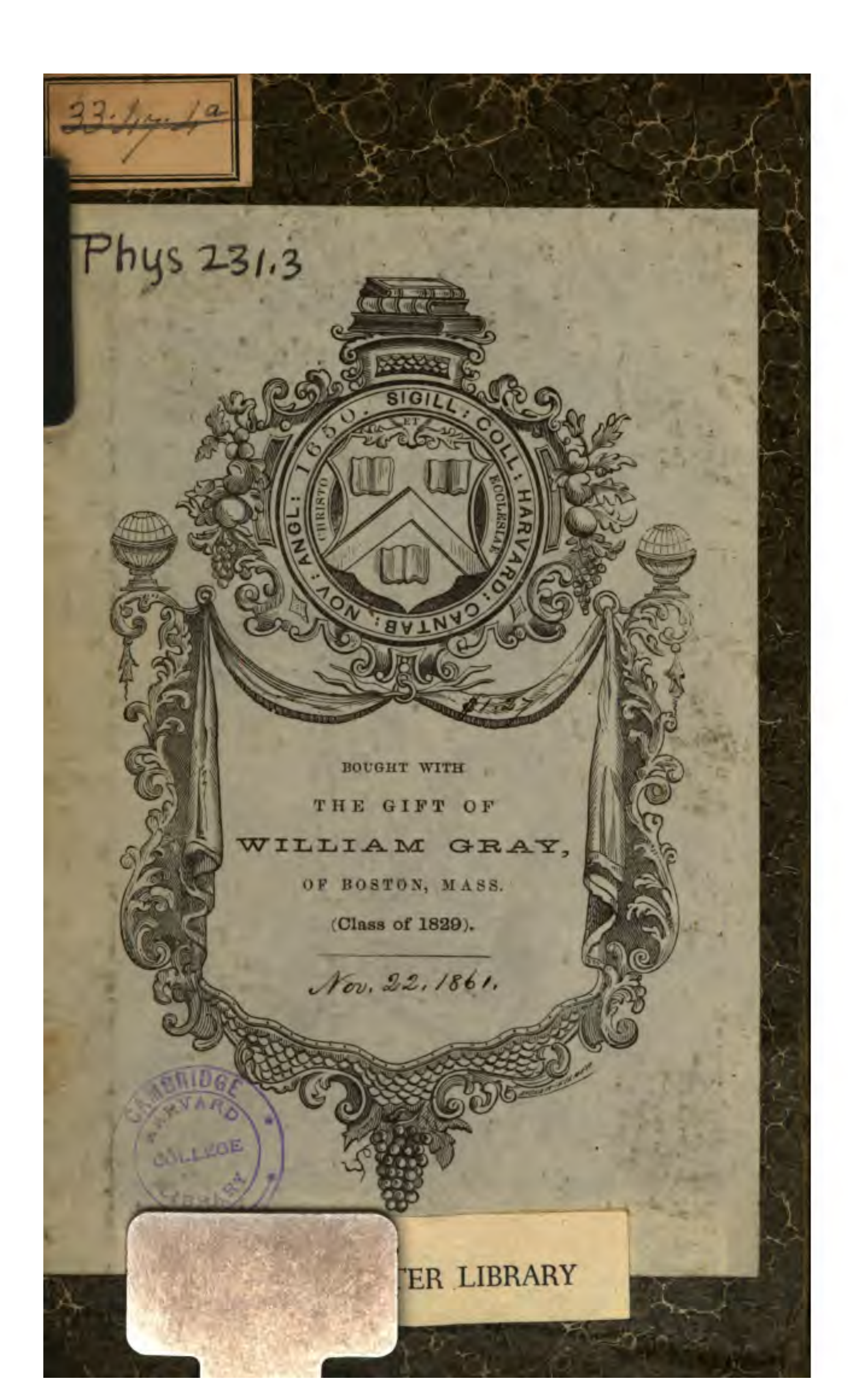
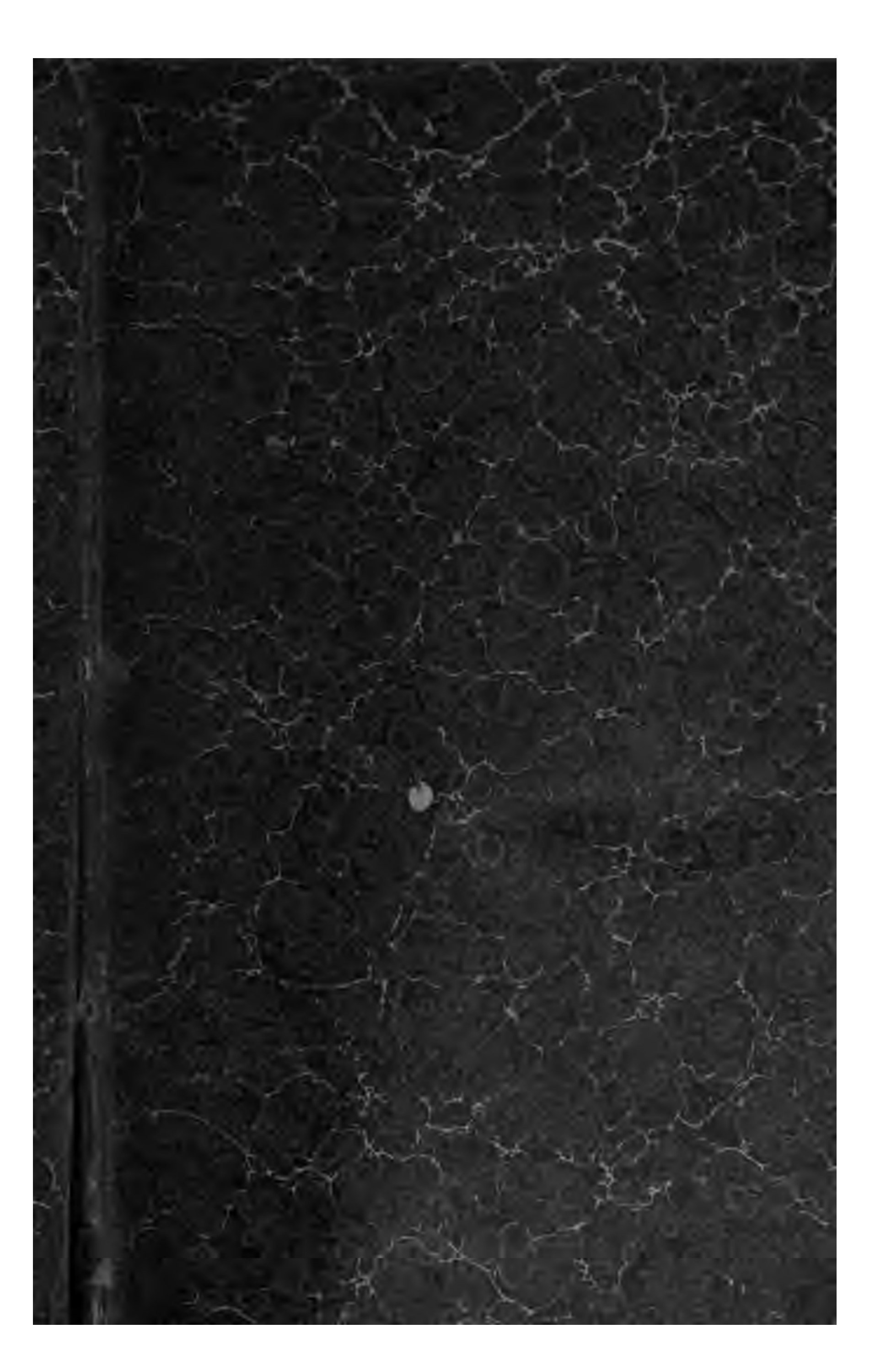






SIGILL: COLL: HARVARD: CANTAB: NOV: ANGL: 1650.
CHRISTO ET ECCLESIAE





COURS

DE

PHYSIQUE

OUVRAGE DU MÊME AUTEUR

TRAITÉ ÉLÉMENTAIRE DE PHYSIQUE EXPÉRIMENTALE ET APPLIQUÉE ET DE MÉTÉOROLOGIE

Suivi d'un Recueil de Problèmes, et illustré de 565 belles gravures sur bois, à l'usage des établissements d'instruction, des aspirants aux grades des Facultés et des candidats aux diverses écoles du Gouvernement.

SEPTIÈME ÉDITION

Un fort volume in-12, prix broché : 7 francs.

PARIS. — IMPRIMERIE DE J. CLAYE, RUE SAINT-BENOIT, 7.

COURS

DE

PHYSIQUE

PUREMENT EXPÉRIMENTALE

A L'USAGE DES GENS DU MONDE

DES ASPIRANTES AU BREVET SUPÉRIEUR
DES ÉLÈVES DES ÉCOLES NORMALES, DES INSTITUTIONS DE DEMOISELLES
ET EN GÉNÉRAL DES PERSONNES ÉTRANGÈRES AUX CONNAISSANCES
MATHÉMATIQUES

PAR A. GANOT

PROFESSEUR DE PHYSIQUE

OUVRAGE ORNÉ DE 308 MAGNIFIQUES VIGNETTES

DESSINÉES PAR GAGNIET
GRAVÉES SUR BOIS PAR QUARTELEY, DUJARDIN, LAMBERT
ET EN RELIEF, SUR CUIVRE, PAR E. SALLE

PARIS

CHEZ L'AUTEUR-ÉDITEUR

17 RUE DE VAUGIRARD, ET RUE DE L'ÉPERON, 12

1859

COURS

ÉLÉMENTAIRE

DE PHYSIQUE

LIVRE PREMIER

PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES ET GRAVITATION UNIVERSELLE

CHAPITRE I

NOTIONS PRÉLIMINAIRES

1. **Objet de la physique.** — Le mot ***physique*** vient d'un mot grec qui signifie ***nature***, parce que les anciens comprenaient sous le nom de physique, l'étude de la nature entière; faisant entrer dans le domaine de cette science, la ***mécanique***, l'***astronomie***, la ***chimie***, la ***botanique***, la ***zoologie***, la ***médecine***, l'***astrologie*** même, et la ***divination*** soit par les astres, soit par l'observation de la physionomie.

De nos jours, la physique est bien plus limitée. En effet, laissant de côté les sciences et les arts que nous venons d'énumérer, elle a simplement pour objet l'***étude des phénomènes qui se manifestent dans les corps terrestres inorganiques, sans modification de leur substance.***

Nous disons les corps ***terrestres***, parce que les phénomènes que

présentent les corps célestes sont du domaine de l'astronomie ; et corps *inorganiques*, parce que les phénomènes qu'on observe dans les corps organiques, comme les plantes et les animaux, sont du ressort de la botanique et de la zoologie. Enfin, la restriction que la physique ne traite que des phénomènes qui n'entraînent point de changement dans la composition des corps est nécessaire, car il est une autre science, la *chimie*, qui, elle aussi, s'occupe des phénomènes que nous offrent les corps terrestres, mais seulement quand la substance de ces corps est modifiée par la séparation de leurs éléments, ou par l'addition d'éléments nouveaux.

Par exemple, lorsque, par le refroidissement, l'eau passe à l'état de glace, et qu'ensuite, en la chauffant, cette glace se transforme de nouveau en eau, on retrouve exactement le même liquide qu'auparavant ; non-seulement toutes ses propriétés sont les mêmes, mais la substance qui le compose est identiquement ce qu'elle était. Le passage de l'eau à l'état de glace et le retour de celle-ci à l'état liquide, sont donc des phénomènes physiques. De même, lorsqu'un objet fragile, un vase de porcelaine, vient à tomber, il se brise, mais chaque fragment conserve rigoureusement la même composition. La chute du vase et sa rupture contre le sol sont donc encore des phénomènes physiques.

Au contraire, lorsque du bois brûle, sa substance est profondément modifiée. Le bois, qui est formé de différentes espèces de matières, est décomposé : une partie de ses éléments se dégage dans l'atmosphère sous forme de fumée, tandis que l'autre donne lieu à un résidu composé de cendre et de charbon. En un mot, la substance qui constitue le bois est disparue et remplacée par d'autres tout à fait différentes. La combustion du bois est donc un phénomène chimique.

2. **Matière, corps, masse, densité.** — On nomme *matière* tout ce qui peut affecter un ou plusieurs de nos sens, c'est-à-dire tout ce dont nous pouvons reconnaître l'existence par la vue, l'ouïe, le tact, le goût ou l'odorat.

Tout objet matériel est un *corps :* une pierre, un arbre, un meuble, l'eau, l'air, sont des corps.

La *masse* d'un corps est la quantité de matière contenue dans ce corps. A volume égal, les différentes substances contiennent, en

général, des quantités de matière très-différentes. Par exemple, il sera démontré bientôt que, sous le même volume, le plomb contient à peu près onze fois plus de matière que l'eau, et l'or dix-neuf fois plus. Ce qu'on exprime en disant que la masse du plomb égale onze fois celle de l'eau, et la masse de l'or dix-neuf fois celle du même liquide. On indique qu'un corps a plus de masse qu'un autre, à volume égal, en disant qu'il est plus *dense*, en sorte que la *densité* d'un corps, par rapport à un autre, est un nombre qui exprime combien le premier corps contient de matière comparativement au second.

3. **Corps simples et corps composés.** — En présence des corps si nombreux et si variés que nous présente la nature, il est curieux de rechercher si chacun d'eux est formé d'une substance propre, ou si un petit nombre de substances élémentaires, en se groupant entre elles, peuvent donner naissance à l'eau, à l'air, aux roches, aux plantes, aux animaux; enfin, à tous les corps qui se présentent à notre observation. Les philosophes de l'antiquité n'admettaient, dans la nature, que quatre éléments : la *terre*, l'*eau*, l'*air* et le *feu;* ce n'est que dans les temps modernes, depuis un siècle environ, que les chimistes et les physiciens sont parvenus à décomposer et à recomposer tous les corps qui sont formés de plusieurs substances, et à y trouver soixante-deux éléments, qu'on désigne sous le nom de *corps simples*, pour exprimer qu'ils ne contiennent chacun qu'une seule espèce de matière; tels sont tous les *métaux*, l'*oxygène*, l'*hydrogène*, l'*azote*, le *soufre*, le *charbon* ou *carbone*, le *phosphore*, le *chlore*, etc.; tous les autres corps de la nature sont *composés*, c'est-à-dire formés par la combinaison de deux, de trois, de quatre corps simples au plus, car chaque corps composé ne renferme jamais qu'un petit nombre de corps simples. Par exemple, l'eau est composée de deux corps simples : l'oxygène et l'hydrogène; le bois de trois: le carbone, l'oxygène et l'hydrogène; les chaires des animaux de quatre: le carbone, l'oxygène, l'hydrogène et l'azote.

4. **Composition intime des corps, molécules, atomes, forces moléculaires.** — De nombreuses propriétés des corps font voir qu'ils ne sont point formés d'une matière continue et compacte, comme ils le paraissent, en général, mais qu'ils sont des agglomérations

de parties matérielles excessivement petites, qu'on nomme ***atomes***. Ceux-ci, en se groupant entre eux, forment des parcelles matérielles encore extrêmement petites qu'on appelle ***molécules***; et, enfin, les molécules, en s'unissant entre elles, donnent naissance aux différents corps qui existent dans la nature. Vu leurs petites dimensions, les atomes et les molécules sont complétement invisibles et impalpables. Les poussières les plus ténues qu'on voit en suspension dans l'atmosphère, sont bien loin d'être de simples molécules, car elles en contiennent encore un nombre considérable.

Or, les mêmes propriétés qui ont conduit les physiciens à admettre l'existence des atomes et des molécules, leur ont fait reconnaître que ces petites parties des corps ne se touchent pas, mais sont simplement juxtaposées, en conservant entre elles des intervalles extrêmement petits, que nous étudierons bientôt sous le nom de *pores* (10).

Mais alors, dira-t-on, comment se fait-il que les corps ne tombent pas d'eux-mêmes en poussière? Qu'est-ce qui leur donne la solidité, la dureté? Enfin, quel est le lien invisible qui unit les atomes et les molécules? Ce lien est une attraction réciproque que les parties constituantes des corps exercent les unes sur les autres, et en vertu de laquelle elles tendent toujours à se rapprocher, de la même manière que l'aimant attire le fer.

Cette force attractive, qu'on désigne sous le nom d'***attraction moléculaire***, n'est pas la seule force qui agisse sur les petites parties dont les corps sont composés, sinon ces parties seraient immédiatement en contact, ce qui n'a jamais lieu. Elles obéissent encore à une force de répulsion, en vertu de laquelle elles tendent sans cesse à s'écarter, et qui a pour cause la ***chaleur***. L'expérience montre, en effet, que toutes les fois qu'on chauffe un corps, son volume augmente, ce qui indique que les molécules s'écartent, et qu'au contraire, lorsqu'on le refroidit, son volume diminue, ce qui prouve que les molécules se rapprochent.

En résumé, on peut donc dire que tous les corps sont formés de parties excessivement petites qui ne se touchent pas, mais sont maintenues à des distances infiniment petites les unes des autres par l'action combinée de deux principes opposés : l'un attractif,

l'autre répulsif. C'est-à-dire que dans le monde physique comme dans le monde moral, dans la matière brute comme dans les êtres sensibles, tout n'est qu'attraction et répulsion, rapprochement et éloignement, sympathie et antipathie. De ces deux principes, l'attraction et la répulsion, toujours aux prises, tantôt vainqueurs, tantôt vaincus, résultent les trois états des corps que nous allons considérer.

5. **Divers états des corps.** — Quand on compare entre eux les différents corps qui se rencontrent dans la nature, ils présentent des caractères qui permettent de les diviser en trois classes bien distinctes : les *solides*, les *liquides* et les *gaz*.

1° On nomme *solides* tous les corps qui possèdent une dureté plus ou moins grande, et conservent par eux-mêmes la forme qui leur est naturelle, ou celle que l'art leur a donnée. Tels sont les bois, les pierres, les métaux, du moins dans les conditions ordinaires de température. Dans ces corps, l'attraction moléculaire est généralement très-grande, ce qui est cause de la résistance qu'on rencontre lorsqu'on veut les séparer en plusieurs parties, ou modifier leur forme.

2° Les *liquides* sont des corps qui ne présentent aucune dureté et ne possèdent aucune forme propre, mais prennent immédiatement celle des vases dans lesquels on les verse: tels sont l'eau, le vin, le lait. Dans les liquides, l'attraction moléculaire est sensiblement en équilibre avec la force répulsive de la chaleur, ce qui est démontré par la facilité avec laquelle leurs molécules peuvent glisser les unes sur les autres, et par le peu de résistance qu'on rencontre lorsqu'on y plonge un corps.

3° Les *gaz*, qu'on désigne aussi sous le nom de *fluides aériformes*, à cause de l'analogie qu'ils ont avec l'air, sont des corps extrêmement substils et légers; tels sont l'oxygène, l'hydrogène, l'azote, l'acide carbonique, le chlore; l'air, au milieu duquel nous vivons, est un mélange d'oxygène et d'azote. Sauf un petit nombre, qui sont coldrés, les gaz sont invisibles. C'est ce qui fait qu'un vase de verre plein d'air, nous paraît ne rien contenir. Il en est de même s'il est plein d'hydrogène, d'acide carbonique ou de tout autre gaz incolore. Dans les gaz, la force répulsive que la chaleur exerce entre les molécules l'emporte sur l'attraction mo-

léculaire (4), d'où il résulte que ces corps tendent toujours à augmenter de volume. Cette propriété sera étudiée bientôt sous les noms de *force élastique*, de *tension*, d'*expansibilité* des gaz.

Un grand nombre de corps peuvent successivement passer par les trois états qu'on vient de considérer. Par exemple, l'eau, par un froid intense, est solide; à la température ordinaire, elle est liquide; chauffée davantage, elle se transforme en un fluide aériforme qu'on nomme *vapeur*, et qui est tout à fait analogue aux gaz. Le soufre, la plupart des métaux, présentent les mêmes phénomènes.

6. **Phénomènes, leurs causes, fluides impondérables.** — Dans le langage ordinaire, on entend par phénomène tout ce qui présente quelque chose d'extraordinaire; en physique, un effet quelconque, même le plus simple, est un *phénomène:* un corps qui tombe, de l'eau qui bout, une cloche qui résonne, notre image qui se produit dans un miroir, une bougie qui nous éclaire, sont autant de phénomènes.

Quelque variés que soient les phénomènes qui se présentent à notre observation dans la nature, on peut les rapporter tous à un petit nombre de causes, ou *agents physiques*, qui sont : les *forces moléculaires*, la *pesanteur*, le *calorique* (agent de la chaleur), la *lumière*, le *magnétisme* et l'*électricité*. De là, dans l'étude de la physique, autant de parties distinctes dont nous aurons successivement à nous occuper. Pour le moment, bornons-nous à dire que pour expliquer les phénomènes qui dépendent du calorique, de la lumière, du magnétisme et de l'électricité, on a admis, comme causes de ces phénomènes, des fluides infiniment plus subtils que les gaz, complétement impalpables et invisibles, qui ont reçu le nom de *fluides incoercibles*, pour exprimer qu'on ne peut ni les saisir ni les comprimer en vase clos, comme peuvent l'être les fluides aériformes; on les nomme encore *fluides impondérables*, pour indiquer que ces matières subtiles ne pèsent pas. Leur poids, du moins, si elles en ont un, n'est pas appréciable aux balances les plus sensibles. Par exemple, une pièce d'argent ne pèse pas plus quand elle est fortement chauffée que lorsqu'elle est froide.

Dans l'état actuel de la science, on admet un fluide spécial pour la chaleur, un pour la lumière, un autre pour l'électricité et le magnétisme. Mais souvent ces fluides semblent se confondre, et

plusieurs physiciens ne sont pas éloignés de n'admettre qu'un seul fluide universellement répandu, auquel doivent être rapportés non-seulement l'électricité et le magnétisme, mais la chaleur et la lumière.

CHAPITRE II

PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES CORPS.

7. **Étendue.** — On entend par *propriétés générales* celles qui sont communes à tous les corps, solides, liquides ou gazeux ; telles sont l'*étendue*, l'*impénétrabilité*, la *divisibilité*, la *porosité*, la *compressibilité*, l'*élasticité*, l'*inertie* et la *pesanteur*. Toutefois, ce ne sont pas là les seules propriétés générales ; nous constaterons qu'il en existe encore plusieurs, qui seront étudiées, les unes en traitant de la chaleur, les autres en traitant de l'électricité.

La première propriété générale que nous présentent les corps est leur *étendue*, c'est-à-dire la portion de l'espace qu'ils occupent. Tous les corps, même les plus petits, même les atomes, ont une étendue. Si l'on ne considère l'étendue que dans un sens seulement, la longueur, on a la *ligne ;* si on la considère en deux sens, longueur et largeur, on a la *surface ;* enfin, prise en trois sens, longueur, largeur et épaisseur, elle constitue le *volume*. Il est à remarquer que l'étendue n'est pas seulement une propriété générale, mais en outre une propriété *essentielle*, car il est évident qu'un corps ne peut exister sans une certaine forme, et, par suite, sans occuper une portion plus ou moins grande de l'espace.

8. **Impénétrabilité.** — L'*impénétrabilité* est une propriété en vertu de laquelle deux corps ne peuvent occuper simultanément le même lieu de l'espace.

Cette propriété est évidente par elle-même et doit, de même que l'étendue, être regardée comme une propriété essentielle. Cependant, souvent on observe des phénomènes dans lesquels il semble y avoir pénétration d'un corps par un autre. Par exemple, si l'on mélange un litre d'eau avec un litre d'alcool, on trouve que le

volume du mélange est moindre que deux litres. Une contraction semblable se produit dans les alliages de certains métaux, par exemple, dans celui du zinc et du cuivre connu sous le nom de laiton. On pourrait croire que, dans ces divers phénomènes, il y a pénétration des parties, mais il y a seulement un groupement nouveau, un changement de position des molécules, et, par suite, un rapprochement entre elles et une diminution de l'espace occupé par les pores.

Il n'y a pas davantage pénétration lorsqu'on enfonce un clou dans du bois. Les molécules de celui-ci sont repoussées par le clou, mais partout où il a pénétré, il n'y a plus de bois. Quand on verse de l'eau sur un monceau de sable, on la voit disparaître aussitôt; or, ce n'est pas dans la substance même du sable que le liquide pénètre, c'est dans les interstices qui existent entre les grains de sable.

9. **Divisibilité.** — La *divisibilité* est la propriété qu'ont tous les corps de pouvoir être partagés en parties plus ou moins petites. Cette propriété est remarquable par l'extrême ténuité des parties dans lesquelles les corps peuvent être divisés, ainsi que le montrent de nombreux exemples. Nous citerons les suivants :

La couleur rouge connue sous le nom de *carmin* a un pouvoir colorant si riche que cinq centigrammes de cette substance, formant à peu près le poids et le volume d'un grain de blé, suffisent pour colorer d'une manière sensible dix litres d'eau. Or, un litre contenant un million de millimètres cubes, si l'on admet que chaque millimètre cube d'eau contienne dix molécules de carmin, ce qui est encore bien au-dessous de la vérité, cela donne dix millions de parties visibles dans cinq centigrammes de carmin.

On a encore un exemple de l'extrême divisibilité de la matière dans les *animaux microscopiques*, qu'on nomme ainsi parce qu'ils sont tellement petits qu'ils échappent complétement à l'œil nu, et ne sont visibles qu'à l'aide d'instruments grossissants, nommés *microscopes*. On rencontre ces petits animaux dans la colle de pâte, quand elle a fermenté, dans les eaux stagnantes, dans le vinaigre, dans la croûte des fromages secs, etc. ; quelques-uns sont tellement petits, que plusieurs centaines pourraient tenir sur la pointe d'une épingle. Cependant ces animaux se meu-

vent, se nourrissent ; ils ont donc des organes, et, par conséquent, combien sont petites les particules dont ceux-ci sont formés !

Comme exemple de divisibilité, on peut aussi citer les molécules émises dans l'atmosphère par les matières odorantes. Par exemple, on a constaté qu'un morceau de musc, qui avait fourni pendant vingt ans des émanations odorantes à l'air libre, n'avait rien perdu de son poids. De même, on a analysé chimiquement l'air infect pris dans les égouts de Paris, et celui qui avait été recueilli dans un espace libre sur les quais, près du pont de la Concorde, et on n'a pu y constater aucune différence de composition.



Fig. 1. — Porosité.

10. Porosité. — On nomme *pores* les intervalles extrêmement petits qu'on a vus ci-dessus exister entre les molécules des corps (4), et *porosité* la propriété que présentent tous les corps d'avoir des pores.

Les pores se distinguent facilement dans l'éponge, dans plusieurs espèces de pierres, dans les bois tendres, mais dans beaucoup de corps ils ne sont pas visibles; toutefois, l'expérience n'en démontre pas moins l'existence. Dans les cours, on démontre la porosité au moyen de l'expérience suivante : on a un long tube de verre (fig. 1) surmonté d'un godet de cuivre, dont le fond est un disque de cuir épais. A sa partie inférieure, ce tube est terminé par un pied de

cuivre qui se visse sur une machine qui sera décrite plus tard sous le nom de *machine pneumatique*, et qui n'est autre chose qu'une pompe à air dont on se sert pour faire le vide, c'est-à-dire pour retirer des vases l'air qu'ils contiennent. Cela posé, on verse, dans le godet, du mercure, métal liquide, à la température ordinaire, comme du plomb fondu, et connu vulgairement sous le nom de *vif-argent*. Puis, au moyen de la pompe à air, on fait le vide dans le tube : aussitôt, le poids de l'atmosphère, qui pèse extérieurement sur le mercure, le force à passer en pluie fine à travers le disque de cuir, ce qui démontre qu'il y a dans celui-ci des trous, des pores, qui livrent passage au mercure.

En 1661, les membres de l'académie *del Cimento*, à Florence, constatèrent la porosité des métaux de la manière suivante : voulant s'assurer si l'eau pouvait diminuer de volume par l'effet d'une forte pression, ils prirent une petite sphère d'or, creuse; la remplirent d'eau, puis après en avoir fermé hermétiquement l'ouverture en la soudant, ils la frappèrent à coups de marteau, pour voir s'il leur serait possible d'en réduire le volume. Or, à chaque coup, l'eau suintait à travers les parois et apparaissait à l'extérieur comme un dépôt de rosée, ce qui démontrait la porosité de l'or. Depuis, plusieurs physiciens ont expérimenté sur d'autres métaux, et sont arrivés au même résultat.

Les physiciens de Florence avaient conclu de l'expérience qui vient d'être décrite que les liquides étaient incompressibles, c'est-à-dire ne pouvaient être réduits de volume par l'effet de la pression; or, cette conclusion n'était pas exacte, car on a constaté, depuis, que le volume des liquides diminue par l'effet de la pression, mais d'une quantité très-faible. Par le refroidissement, la diminution de volume est beaucoup plus considérable. De ces deux faits, on conclut que les molécules des liquides sont susceptibles de se rapprocher, et dès lors qu'il existe entre elles des pores. La rapidité avec laquelle la plupart des liquides se mélangent est encore une preuve de leur porosité.

Quant à la porosité de l'air et des autres gaz, elle est prouvée par la grande réduction de volume qu'ils subissent par la pression, et par cette propriété remarquable que si l'on introduit un gaz dans un espace qui en contient déjà un autre, le premier, en vertu de sa

force expansive, se répand aussitôt dans l'espace donné, comme s'il n'y avait pas déjà un autre gaz, ce qui prouve évidemment que les molécules du nouveau gaz vont se loger dans les pores du premier. Il est donc démontré par l'expérience que la porosité est commune aux solides, aux liquides et aux gaz.

11. **Application de la porosité, filtres.** — La porosité présente de nombreuses applications, notamment celle qu'on en a faite à la

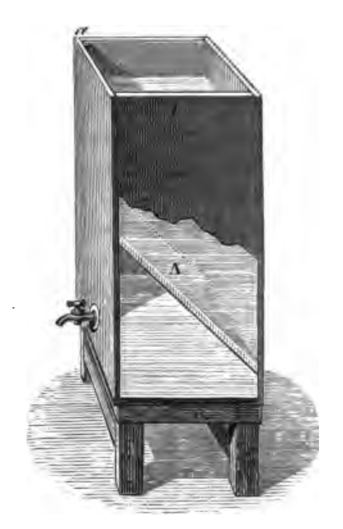




Fig. 2. — Fontaine filtrante.



Fig. 3. — Chausse d'Hippocrate.

filtration. On nomme ainsi une opération qui a pour but de clarifier les liquides en les séparant des parcelles de matière qui sont mélangées avec eux, comme cela a lieu, par exemple, pour les eaux de rivière, lorsque après une crue subite, elles sont troublées par les matières terreuses qu'elles entraînent.

La filtration s'opère à l'aide de substances dont les pores sont assez grands pour laisser passer les molécules des liquides, mais trop petits pour donner passage aux substances solides qu'ils tiennent en suspension. Les appareils employés à cet usage se dési-

gnent sous le nom de *filtres;* on en construit en papier non collé, en feutre, en pierres poreuses, en charbon pilé, etc. La figure 2 montre un filtre très en usage dans l'économie domestique, sous le nom de *fontaine filtrante*. C'est une caisse de bois, d'un mètre de hauteur environ, divisée intérieurement en deux compartiments par une pierre poreuse A, qui est visible dans le dessin, à l'aide d'une déchirure qu'on a figurée dans l'une des parois de la caisse. L'eau est d'abord versée dans le compartiment supérieur, d'où elle passe lentement dans le second, à travers les pores de la pierre. Or, ces pores ne pouvant donner passage aux matières étrangères qui sont en suspension dans le liquide, il en résulte que l'eau qu'on recueille à la partie inférieure de la fontaine est parfaitement clarifiée. Dans un des angles de la caisse est un tube *a*, qui aboutit au compartiment inférieur et permet à l'air de s'échapper à mesure que l'eau pénètre dans ce compartiment.

La figure 3 représente un filtre connu dans les pharmacies sous le nom de *chausse d'Hippocrate*, du nom d'un célèbre médecin de l'antiquité; c'est une espèce de poche conique, en feutre, qu'on suspend par trois galons. Ayant versé dans l'intérieur le liquide qu'on veut filtrer, celui-ci s'écoule lentement au travers des pores du tissu, tandis que toutes les parties solides, qui n'étaient qu'en suspension dans le liquide et le troublaient, restent sur le filtre. Ce mode de filtration est très-bon pour clarifier les sirops et les liqueurs.

On se sert aussi, comme filtres, de couches de charbon de bois pulvérisé, à travers lesquelles passent les liquides. Une couche de sable, de verre pilé, produit le même effet. C'est à leur filtration naturelle à travers les terres que les eaux de source doivent leur limpidité.

C'est par un effet de porosité que les charbons incandescents, recouverts de cendre, brûlent lentement; l'air qui pénètre à travers les pores de la cendre entretient la combustion. Si les charbons étaient recouverts d'une substance imperméable à l'air, ils s'éteindraient, car c'est l'air qui, au moyen de l'oxygène qu'il contient, entretient la combustion.

Enfin, c'est à cause de leur porosité que beaucoup de corps, comme les bois, les cordes, le papier, les pierres, se laissent péné-

trer par l'humidité de l'air, d'où résulte, dans les bois, un gonflement qui est la cause des craquements que les meubles et les boiseries font souvent entendre dans nos appartements. Nous reviendrons plus tard sur ces phénomènes en parlant de l'*imbibition* (61).

12. **Compressibilité.** — La *compressibilité* est la propriété qu'ont



Fig. 4. — Compressibilité des gaz.

les corps, sans rien perdre de leur masse, de diminuer de volume par l'effet d'une pression plus ou moins considérable. Cette propriété, qui est due au rapprochement des molécules, est, en même temps, une conséquence et une preuve de la porosité.

La compressibilité est très-apparente dans les éponges, le caoutchouc, le liége, la moelle de sureau, le papier, les étoffes; il suffit,

en effet, de comprimer ces corps entre les doigts pour en réduire notablement le volume.

La compressibilité des métaux est démontrée par les empreintes que reçoivent les médailles et les monnaies sous la pression de puissants appareils qu'on nomme *balanciers*.

Quant aux liquides, on a déjà vu que leur compressibilité est très-faible, tellement faible qu'on les a longtemps regardés comme complétement incompressibles (10); cependant, nous verrons bientôt que leur compressibilité a été constatée par l'expérience (67).

Les plus compressibles de tous les corps sont les gaz, qui peuvent être amenés, par des pressions suffisantes, à un volume dix, vingt et même cent fois moindre que celui qu'ils occupaient d'abord. Pour montrer avec quelle facilité on peut réduire le volume des gaz, on prend un tube de verre fermé par un bout (fig. 4), et on y introduit, par l'autre bout, un piston qui le ferme hermétiquement. L'air qui se trouve alors renfermé dans le tube ne peut s'échapper, et cependant, en pressant sur la poignée du piston, on voit celui-ci entrer jusqu'à la moitié, aux deux tiers, aux trois quarts du tube, ce qui prouve que le volume d'air se réduit successivement à moitié, au tiers, au quart de ce qu'il était d'abord. Toutefois, la plupart des gaz, lorsqu'on les comprime ainsi, présentent une propriété remarquable, sur laquelle nous aurons occasion de revenir, c'est de se *liquéfier*, c'est-à-dire de passer de l'état gazeux à l'état liquide.

13. **Élasticité.** — L'*élasticité* est la propriété que possèdent les corps, lorsqu'on les a comprimés, courbés, tordus ou étirés, de reprendre d'eux-mêmes leur forme et leur volume primitifs, aussitôt qu'ils redeviennent libres. De là quatre sortes d'élasticité : l'élasticité par pression, comme celle des gaz; l'élasticité par flexion, qu'on observe dans les ressorts; l'élasticité par torsion, qui se produit dans les fils de chanvre, de coton, lorsqu'ils se détordent; et, enfin, l'élasticité par tension, qui est celle des cordes de piano, de guitare, de violon, lorsqu'elles sont tendues.

L'élasticité, de quelque espèce qu'elle soit, est le résultat d'un déplacement moléculaire; si les molécules ont été rapprochées par la pression, la force répulsive du calorique tend à les écarter (4); si, au contraire, elles ont été écartées, l'attraction moléculaire agit

pour les rapprocher. Qu'on courbe, par exemple, un fanon de baleine, les molécules, dans la partie concave, se trouvant comprimées, il y a répulsion entre elles; dans la partie convexe, au contraire, où elles sont écartées, elles font effort pour se rapprocher, et c'est en vertu de ces deux efforts que le fanon redevient droit aussitôt qu'il est libre.

Les corps les plus élastiques sont les gaz; après eux viennent l'acier trempé, les fanons de baleine, le caoutchouc, le crin, la laine, l'ivoire, le verre, le marbre, etc. Pour démontrer l'élasticité de ces derniers corps, de l'ivoire, par exemple, et, en même temps, le déplacement moléculaire qui en est la cause, on fait l'expérience suivante : sur une plaque de marbre polie et recouverte d'une couche très-légère d'huile, on laisse tomber une bille d'ivoire, d'abord d'une faible hauteur, puis ensuite de hauteurs successivement de plus en plus grandes. A chaque fois, la bille rebondit à une hauteur un peu moindre que celle de sa chute, après avoir formé, sur la couche d'huile, au point où elle a frappé, une empreinte circulaire d'autant plus large qu'elle est tombée d'une plus grande hauteur (fig. 5). On conclut de là que la bille s'aplatit à chaque fois par l'effet du choc, et que c'est ensuite par la réaction des molécules comprimées qu'elle rebondit.

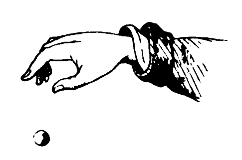




Fig. 5. — Élasticité.

14. **Applications de l'élasticité.** — L'élasticité nous presente de nombreuses applications. Par exemple, c'est parce qu'ils sont élastiques que les bouchons de liége ferment hermétiquement les bouteilles. Introduits avec force dans le goulot, ils se trouvent comprimés, et réagissant alors, en vertu de leur élasticité, contre les parois, ils s'opposent à la sortie du liquide.

C'est à l'élasticité de l'air que sont dus ces ballons rebondissants qu'on voit servir de jouets aux écoliers dans nos jardins publics. Ces ballons sont en caoutchouc gonflé d'air; quand ils viennent frapper le sol ou un mur, leur volume diminue, et l'air qu'ils renferment se trouvant subitement comprimé, il se détend, et, réagissant comme un ressort, fait rebondir le ballon.

L'élasticité de l'air est encore utilisée dans ces coussins dont on voit quelques voyageurs faire usage pour être assis plus mollement. Formés d'une étoffe imperméable aux gaz, à l'aide d'un enduit de caoutchouc, ces coussins sont gonflés d'air; devenant ainsi très-compressibles et très-élastiques, ils forment un siége fort doux.

Sous le nom de ***fusils à vent***, on rencontre dans les cabinets de physique des fusils dont la culasse, qui est en acier, est creuse. Dans cette culasse on comprime fortement de l'air à l'aide d'une pompe qui sera décrite plus tard sous le nom de ***pompe de compression***, et c'est ensuite cet air comprimé qui, en vertu de sa force expansive, lance les projectiles. C'est donc encore là une application de l'élasticité de l'air.

C'est sur l'élasticité de l'acier qu'est fondé l'usage des ressorts de voitures et celui des ressorts qui servent de moteurs aux montres et aux pendules. De même, c'est à cause de leur élasticité que la laine, le crin, la plume, sont utilisés dans les sommiers, dans les matelas, dans les oreillers, dans les siéges de nos appartements, etc.

Enfin, c'est en vertu de leur élasticité que les cordes de piano, de guitare, de violon, peuvent, par l'effet de la pression ou du frottement, recevoir un mouvement vibratoire qui, ainsi que cela sera démontré en acoustique, est la cause des sons que rendent les instruments à cordes.

CHAPITRE III

NOTIONS SUR LES MOUVEMENTS, LES FORCES ET LEURS EFFETS.

15. **Repos et mouvement.** — Pour l'intelligence de ce qui nous reste à dire sur l'inertie, la pesanteur, la gravitation universelle,

les mouvements des liquides et des gaz, il est indispensable d'aborder ici quelques-uns des points de contact qui unissent la physique à la mécanique, en donnant quelques notions très-simples sur les mouvements et sur les forces.

On dit d'un corps qu'il est en *repos* quand il persiste dans le même lieu; qu'il est en *mouvement* lorsqu'il passe d'un lieu dans un autre. Le repos et le mouvement sont absolus ou relatifs.

Le *repos absolu* serait la privation complète de mouvement. Or, dans tout l'univers, on ne connaît aucun corps dans cet état, car la terre et les autres planètes tournant sur elles-mêmes et autour du soleil, toutes les parties qui les composent participent à ce double mouvement. Le soleil lui-même est animé d'un mouvement de rotation qui exclut l'idée de repos absolu sur cet astre.

Le *repos relatif* ou *repos apparent* est l'état d'un corps qui paraît fixe par rapport aux corps qui l'environnent, mais qui, en réalité, participe avec eux à un mouvement commun. Par exemple, un corps qui reste à la même place dans un bateau en marche, est en repos par rapport au bateau, mais il est réellement en mouvement par rapport aux rives; ce n'est donc là qu'un repos relatif.

Le *mouvement relatif* d'un corps est son mouvement apparent, c'est-à-dire celui qu'on mesure comparativement à d'autres corps qu'on regarde comme fixes, mais qui eux-mêmes se déplacent. C'est ce qui arrive quand un homme marche sur un vaisseau en mouvement; son déplacement réel n'est pas celui que nous voyons, car, en même temps qu'il marche, cet homme participe au mouvement du bateau, et, en outre, à celui de la terre : ce n'est donc là qu'un mouvement relatif. Le *mouvement absolu* de cet homme serait celui qu'on mesurerait à partir d'un point immuable de position dans l'espace, ce qui ne peut se réaliser, puisqu'on ne connaît aucun point dans cette condition. On voit donc que, dans tout l'univers, le repos et le mouvement relatifs sont les seuls qu'il nous soit donné d'observer.

16. **Différentes espèces de mouvements.** — Les mouvements sont *rectilignes* ou *curvilignes;* rectilignes quand le corps qui se meut parcourt une ligne droite, comme lorsqu'un corps tombe; curvilignes lorsque le mobile parcourt une ligne courbe : tel est le mouvement d'un cheval qui tourne dans un manége.

Chacun de ces mouvements se subdivise en outre en mouvement *uniforme* et en mouvement *varié*.

17. **Mouvement uniforme.** — On dit qu'un mouvement est uniforme quand le mobile parcourt des espaces égaux dans des temps égaux. Tel est, par exemple, le mouvement d'une roue de moulin à eau lorsqu'elle fait exactement le même nombre de tours par minute. Tel est encore le mouvement des aiguilles sur le cadran d'une horloge. Une troupe de soldats qui marchent au pas, nous présente un exemple de mouvement uniforme.

Dans ce genre de mouvement, on nomme *vitesse* l'espace parcouru en une seconde. Par conséquent, si un homme en marche parcourt constamment un mètre par seconde, on dira que sa vitesse est d'un mètre. Au lieu de prendre pour unité de temps la seconde, on peut aussi prendre la minute ou l'heure. Ainsi, lorsqu'un convoi de chemin de fer fait régulièrement 40 kilomètres dans chaque heure successive, on dit que sa vitesse est de 40 kilomètres à l'heure.

18. **Mouvement varié.** — On appelle *mouvement varié* celui dans lequel les espaces parcourus dans des intervalles de temps égaux, sont inégaux. Si les espaces parcourus dans le même temps croissent, le mouvement est dit *accéléré;* tel est le mouvement des convois de chemin de fer au moment du départ; si ces espaces décroissent, comme il arrive quand les convois approchent d'une station, le mouvement est *retardé.*

Enfin, si les espaces parcourus en temps égaux vont toujours en augmentant d'une même quantité, on dit que le mouvement est *uniformément accéléré;* si, au contraire, ils décroissent constamment d'une même quantité, le mouvement est *uniformément retardé.* Nous verrons bientôt des exemples de ces deux mouvements en parlant de la chute des corps.

19. **Inertie de la matière.** — On entend par *inertie* de la matière une tendance naturelle à persister à l'état où elle se trouve; c'est-à-dire à demeurer à l'état de repos, si elle est en repos, et à l'état de mouvement, si elle est en mouvement.

Nos observations journalières nous montrent, en effet, que jamais un corps ne passe de lui-même de l'état de repos à l'état de mouvement. A la vérité, quand les corps tombent, ils semblent se

mettre d'eux-mêmes en mouvement; mais lorsqu'il sera question de la pesanteur, on verra que la cause de leur chute est une attraction qu'exerce sur eux le globe terrestre.

Or, les corps ne tendent pas seulement à persister à l'état de repos, mais aussi à l'état de mouvement, une fois qu'ils le possèdent. Ce dernier principe paraît peut-être moins évident que le premier, parce que nous sommes habitués à voir le mouvement des corps se ralentir graduellement et ceux-ci revenir enfin au repos, comme il arrive à une boule de rampeau lancée sur le sol, ou à une bille d'ivoire qui roule sur le tapis d'un billard. Mais si ces corps retournent ainsi progressivement au repos, ce n'est pas par l'effet d'une préférence naturelle pour cet état, c'est par suite des résistances qui s'opposent à leur mouvement, et qui sont, d'une part, le frottement sur le sol ou sur le tapis, et, de l'autre, la masse d'air qu'ils doivent déplacer pour avancer. En effet, plus ces résistances sont faibles, plus le mouvement se prolonge; c'est ce qui arrive, par exemple, pour la boule de rampeau ci-dessus, si, au lieu de la lancer sur le sol, on la lance, en hiver, sur la glace polie d'un étang.

20. **Applications de l'inertie.** — Un grand nombre de phénomènes s'expliquent par l'inertie. Par exemple, une personne qui descend d'une voiture en marche conserve le même mouvement dont elle était animée avant de descendre, d'où il résulte qu'au moment où elle touche le sol, elle est renversée dans la direction que suit la voiture, si elle n'a pas soin d'avancer un pied dans cette direction.

Un homme qui court et dont le pied heurte un obstacle, tombe en avant; c'est encore là un effet d'inertie, car la chute n'a lieu que parce que le reste du corps tend à conserver le mouvement dont il est animé.

Lorsqu'un cheval au galop s'arrête trop brusquement, celui qui le monte, s'il ne se tient sur ses gardes en serrant fortement les genoux, est lancé, en vertu de son inertie, par dessus la tête du cheval.

C'est par suite de l'inertie qu'on voit les patineurs, une fois qu'ils se sont donné un élan suffisant, être emportés au loin sur la glace sans faire aucun nouvel effort.

C'est encore l'inertie qui rend si terribles les accidents sur les

chemins de fer. Si un déraillement ou toute autre cause vient à arrêter brusquement la locomotive, tout le reste du convoi tendant à conserver son mouvement, les wagons viennent se heurter et se briser les uns contre les autres.

L'effet des projectiles est dû à leur inertie. Quand un boulet de canon traverse un mur, coupe un arbre en deux, c'est par suite de sa tendance à conserver la vitesse que lui a imprimée l'explosion de la poudre. De même, dans les marteaux, dans les pilons, c'est l'inertie qui est utilisée. Quand on enfonce un clou à coups de marteau, celui-ci produit sur la tête du clou d'autant plus d'effet qu'il a plus de masse et qu'il est animé d'une plus grande vitesse.

Nous pourrions citer encore de nombreux exemples; bornons-nous à dire que le *cerceau*, la *toupie*, l'*émigrant*, le *diable*, qui sont des jouets d'enfants, sont encore des applications de l'inertie.

21. **Forces, puissances, résistances.** — Les corps étant inertes par eux-mêmes, on nomme *force* toute cause capable de les faire passer de l'état de repos à l'état de mouvement, ou réciproquement du second état au premier.

Les attractions et les répulsions que nous avons vues s'exercer entre les molécules des corps sont des forces; l'action musculaire que les hommes et les animaux développent pour exercer un travail quelconque est une force; l'élasticité des gaz et des vapeurs qui sera étudiée plus tard est encore une force.

Les forces qui ont pour objet de produire le mouvement se désignent sous le nom de *puissances;* par opposition, celles qui tendent à le détruire s'appellent *résistances*. Par exemple, lorsqu'un homme traîne un fardeau sur le sol, sa force musculaire est une puissance, tandis que le frottement du fardeau contre le sol est une résistance.

Les forces du genre de celles qu'on nomme puissances, tendant toujours à accélérer le mouvement, ont reçu le nom de *forces accélératrices*. Les résistances, au contraire, tendant sans cesse à le retarder, sont dites des *forces retardatrices*.

22. **Caractères distinctifs des forces.** — Dans toute force, il y a lieu de distinguer trois choses : le point d'application, la direction et l'intensité.

Par ***point d'application d'une force***, on entend le point même où s'exerce son action. Par exemple, ayant attaché une corde à un corps et tirant sur cette corde comme le montre la fig. 6, le point d'application de la force est le point A où est attachée la corde.

La ***direction d'une force*** est la ligne droite qu'elle fait ou tend à faire parcourir à son point d'application. Dans la figure ci-dessous, c'est la corde AB qui représente la direction de la force.

Enfin, l'***intensité d'une force***, c'est son énergie, sa grandeur, sa valeur par rapport à une autre force déterminée. Par exemple,

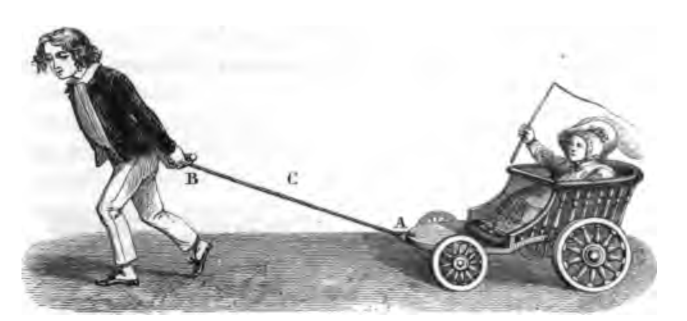


Fig. 6. — Direction et intensité des forces.

dans la figure 6, qui représente un enfant traînant une petite voiture, il faut, de la part de cet enfant, une certaine intensité de force pour traîner cette voiture, mais si celle-ci était deux, trois fois plus chargée, il faudrait une force deux, trois fois plus intense.

L'intensité des forces se mesure en kilogrammes, et on dit qu'une force est de 40, 50 kilogrammes, quand elle est égale à l'effort qu'il faudrait exercer pour soulever un poids de 40 ou de 50 kilogrammes.

L'intensité d'effort que peuvent développer les hommes et les animaux varie beaucoup avec le temps pendant lequel ils travaillent. Un homme qui travaille d'une manière continue pendant plusieurs heures, exerce moyennement un effort de 8 kilogrammes. Un homme qui monte un escalier, sans aucune charge, exerce environ un effort de 65 kilogrammes; aussi ce genre de travail est-il très-pénible, et il est impossible de le continuer longtemps.

Les forces étant ainsi mesurées en kilogrammes, on est convenu de représenter leur intensité à l'aide de la ligne même qui sert à représenter leur direction. Pour cela, on prend sur cette ligne, à partir du point d'application de la force, une longueur qui contienne l'unité linéaire autant de fois que l'intensité de cette force contient elle-même le kilogramme. Par exemple, dans la figure ci-dessus, si l'effort de traction est 7 kilogrammes, on prendra, à partir du point A, une longueur AC égale à 7 fois une unité linéaire quelconque, soit le décimètre; et alors l'effort de traction exercé par l'enfant qui traîne la voiture, sera représenté à la fois, en direction et en intensité, par la ligne AC.

23. **Forces résultantes et forces composantes.** — Lorsqu'un corps

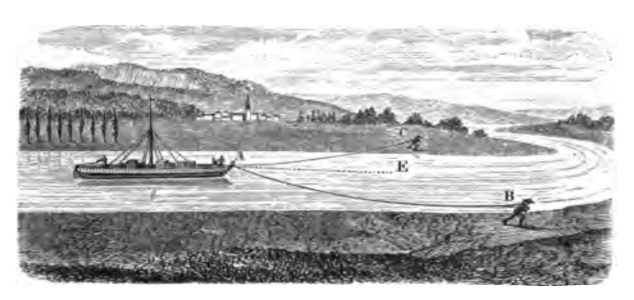


Fig. 7. — Résultante de deux forces.

est sollicité par une seule force, il est évident, s'il n'est gêné par aucun obstacle, qu'il doit se mouvoir suivant la direction de cette force; mais s'il est sollicité à la fois par plusieurs forces de directions différentes, il prend, en général, une direction qui n'est celle d'aucune de ces forces. Par exemple, si deux hommes, placés sur les berges d'une rivière, tirent un bateau à la cordelle, comme le montre la figure 7, le bateau ne suit ni la direction AB, ni la direction AC, suivant lesquelles tirent ces hommes, mais bien une direction intermédiaire AE; c'est-à-dire qu'il avance comme s'il était sollicité par une force unique tirant dans le sens AE.

La force unique, qu'on peut ainsi concevoir dirigée suivant AE et produisant seule le même effet que les forces de traction des deux

hommes, se nomment la ***résultante*** de ces deux forces, et réciproquement, celles-ci, par rapport à la résultante, sont dites des *composantes*.

24. Valeur de la résultante de deux forces concourantes, parallélogramme des forces. — Quand deux forces de directions différentes sont appliquées à un même point d'un corps, comme le représente la figure 7, il existe, entre leurs intensités et celle de leur résultante, une relation simple qui mérite d'être mentionnée ici à cause des nombreuses applications qu'elle présente.

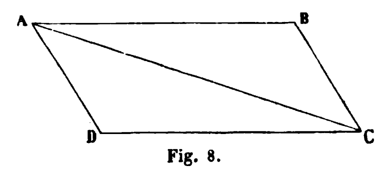


Fig. 8.

Mais, auparavant, nous devons définir le mot ***parallélogramme*** dont nous allons nous servir. En géométrie, on nomme parallélogramme une figure formée par quatre lignes droites parallèles deux à deux (fig. 8); c'est-à-dire que les deux lignes AB et CD sont parallèles entre elles, et qu'il en est de même des lignes AD et BC. Ces différentes lignes s'appellent les ***côtés*** du parallélogramme, et les points A, B, C, D, en sont les ***sommets***. Enfin, on appelle ***diagonale*** la ligne, telle que AC, qui joint deux sommets opposés A et C.

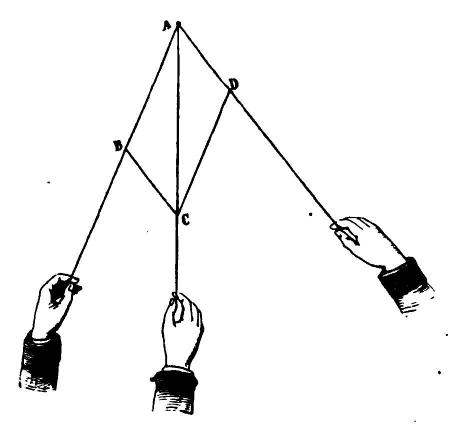


Fig. 9. — Parallélogramme des forces.

Cela posé, on démontre, en mécanique, le principe suivant, connu sous le nom de ***principe du parallélogramme des forces***.

Lorsque deux forces, appliquées à un même point A (fig. 9), ***sont représentées, en direction et en intensité, par les côtés*** AB

et AD *du parallélogramme* ABCD, *leur résultante est elle-même représentée, en direction et en intensité, par la diagonale* AC *de ce parallélogramme.* C'est-à-dire que le point A étant sollicité à la fois par deux forces dont les directions et les intensités sont respectivement représentées par AB et AD, ce point avance dans le sens AC exactement comme s'il était sollicité par une force unique, dont la ligne AC représenterait la direction et l'intensité.

Le principe du parallélogramme des forces nous offre de conti-

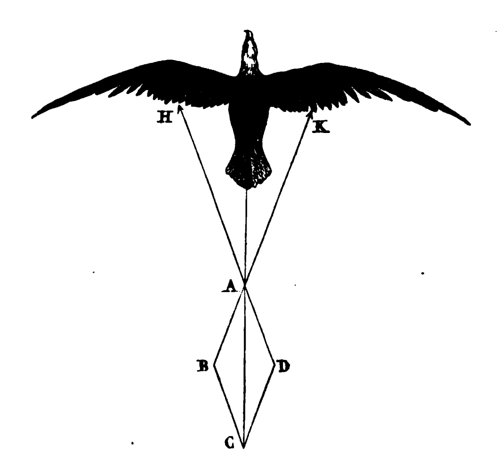


Fig. 10. — Application du parallélogramme des forces.

nuelles applications. Par exemple, dans le vol d'un oiseau, lorsque ses ailes frappent l'air, la résistance que celui-ci leur oppose équivaut, sur chacune d'elles, à une force d'impulsion d'arrière en avant, suivant les directions AH et AK (fig. 10); par suite, si l'on représente par AB et AD les intensités et les directions de ces deux forces d'impulsion, et qu'on construise le parallélogramme ABCD, on trouve que la résultante ou la force unique qui fait avancer l'oiseau, est représentée, en direction et en grandeur, par la diagonale AC. Le même raisonnement s'applique à la natation des hommes et des poissons.

25. Autre effet du parallélogramme des forces. — On vient de voir comment deux forces appliquées à un même point d'un corps peuvent être ramenées à une seule force à l'aide du principe du parallélogramme des forces. Or, réciproquement, à l'aide du même principe, une force unique, appliquée à un corps, peut être remplacée par deux autres forces produisant ensemble le même effet que la première. On dit alors que cette force est ***décomposée*** en deux autres.

Il est rare, en effet, que l'action d'une force soit entièrement utilisée; presque toujours elle est décomposée en deux autres, dont une seule produit un effet utile, et dont l'autre est sans effet ou n'a



Fig. 11. — Décomposition d'une force en deux autres.

qu'un effet nuisible. Par exemple, lorsque le vent souffle sur la voile d'un bateau, non pas exactement de l'arrière à l'avant, mais un peu de côte, comme le montre la fig. 11, l'impulsion du vent, qui a lieu dans la direction *va*, se décompose en deux autres, l'une dans le sens *ca*, de l'arrière à l'avant, l'autre suivant une direction latérale *ba*. C'est la première qui fait avancer le bateau, la seconde ne tend qu'à le faire ***dériver***, c'est-à-dire à le faire avancer latéralement.

Nous rencontrerons plusieurs exemples de forces ainsi décomposées en deux autres, notamment en partant du plan incliné et du pendule.

26. Cas où les forces sont parallèles, valeur de la résultante. — Dans l'exemple du bateau tiré à la cordelle, considéré ci-dessus

(fig. 7), les forces étaient *concourantes*, c'est-à-dire que leurs deux directions allaient se rencontrer en un même point; mais il peut aussi arriver que les forces appliquées à un même corps soient parallèles entre elles, et il se présente alors deux cas : ou ces forces sont de même direction, c'est-à-dire agissent dans le même sens, tel est le cas de deux chevaux qui traînent une voiture; ou bien, elles sont de directions contraires, comme il arrive lorsqu'un bateau à vapeur remonte un fleuve, le courant étant alors opposé à la force impulsive qui fait marcher le bateau. Dans le premier cas, *la résultante des forces est égale à leur somme;* dans le second, *elle est égale à leur différence.*

27. **Équilibre des forces.** — Lorsque plusieurs forces agissent ensemble sur un même corps, elles ne le mettent pas toujours en mou-

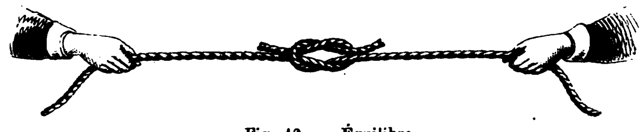


Fig. 12. — Équilibre.

vement; en effet, il peut arriver que quelques-unes de ces forces tendant à faire naître un certain mouvement dans une direction, les autres tendent précisément à produire un mouvement égal et contraire dans la direction opposée. Dans ce cas, il est évident que, se neutralisant les unes et les autres, ces forces ne peuvent produire aucun effet. Toutes les fois que plusieurs forces appliquées à un même corps se détruisent ainsi mutuellement, on dit qu'il y a *équilibre.*

Le cas d'équilibre le plus simple est celui de deux forces égales et contraires appliquées à un même point d'un corps. Par exemple, si deux hommes tirent avec la même intensité sur une corde, l'un dans un sens, l'autre en sens contraire (fig. 12), il est évident qu'il y aura équilibre. De même si, dans un puits, deux seaux d'égale capacité et également remplis d'eau sont suspendus à l'extrémité d'une corde enroulée sur une poulie, le poids de l'un fait nécessairement équilibre au poids de l'autre.

Les corps que nous jugeons ordinairement à l'état de repos, sont, en réalité, à l'état d'équilibre. Par exemple, lorsqu'un corps repose sur une table, il y a équilibre entre la pesanteur qui tend à faire tomber ce corps et la résistance qu'oppose la table à sa chute. Si le poids du corps l'emporte sur cette résistance, l'équilibre est détruit, la table se brise et le corps tombe.

28. **Force centrifuge.** — Nous terminerons ces notions sur les forces par l'étude d'une force particulière que fait naître le mouve-

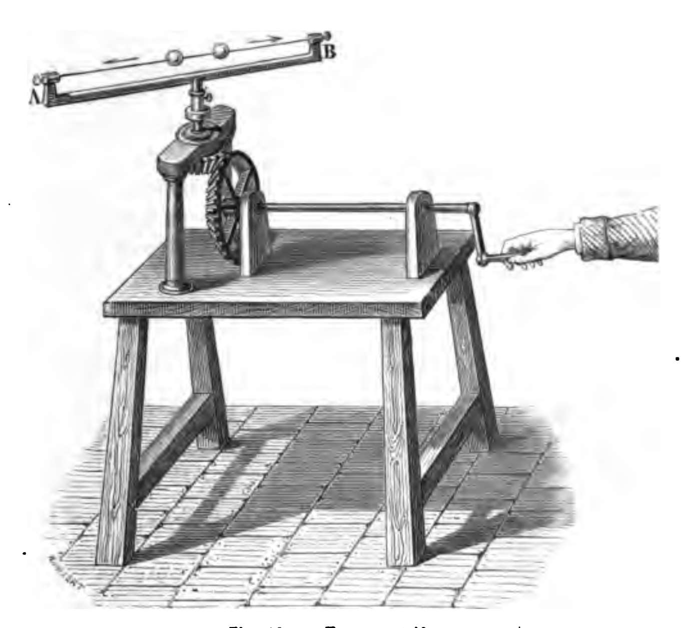


Fig. 13. — Force centrifuge.

ment curviligne, c'est la *force centrifuge*. Pour nous rendre compte de la production de cette force, observons que lorsqu'un corps a été mis en mouvement suivant une certaine direction, il tend toujours, en vertu de son inertie, à se mouvoir suivant la même direction. Par conséquent, toutes les fois que nous voyons un corps se mouvoir en ligne courbe, cela ne peut être que par l'effet d'un

obstacle ou d'une nouvelle force qui le fait dévier; en effet, une ligne courbe pouvant être considérée comme formée d'une suite de petites lignes droites infiniment petites, le mobile tend toujours, par l'effet même de son inertie, à suivre le prolongement de la petite ligne droite qu'il parcourt; il réagit donc pour conserver son mouvement en ligne droite et s'échapper de la courbe qu'il est forcé de parcourir. C'est cette réaction qu'on désigne sous le nom de force *centrifuge*, de deux mots latins qui veulent dire *s'écarter du centre*.

Pour démontrer la production de la force centrifuge dans le mouvement circulaire, on fait usage de l'appareil représenté dans la fig. 13. Sur un châssis de cuivre AB est tendu horizontalement un fil métallique un peu gros, lequel traverse deux billes d'ivoire pouvant glisser librement tout le long du fil. Cela posé, ayant disposé les billes comme le montre la figure, on imprime au châssis un mouvement de rotation rapide, à l'aide de roues d'engrenage et d'une manivelle qu'on fait tourner avec la main. Bientôt les billes, lancées par la force centrifuge, glissent le long du fil et viennent frapper les deux bouts du châssis avec d'autant plus de force que le mouvement de rotation est plus rapide.

29. Effets de la force centrifuge. — La force centrifuge est d'autant plus grande que la vitesse est plus considérable et que la ligne courbe que suit le mobile présente une courbure plus sensible. C'est pour cette raison que les chemins de fer doivent être droits ou à peu près; car les convois étant animés d'une grande vitesse, aussitôt qu'ils se meuvent en ligne courbe, la force centrifuge tend à les lancer hors de la voie.

C'est par l'effet de la force centrifuge que les roues d'une voiture qui roule rapidement sur une route boueuse, projettent la boue qui a adhéré aux jantes.

Dans les cirques, on voit les chevaux et les écuyers qui les montent incliner constamment vers le centre du cirque; c'est afin de faire équilibre, par leur poids, à la force centrifuge qui les renverserait en dehors s'ils se tenaient droits.

Le panier à salade présente encore un effet de force centrifuge. C'est en vertu de cette force, quand on fait tourner le panier, que l'eau qui mouille la salade est projetée au loin.

Si l'on fait rouler un cerceau sur le sol, il peut se mouvoir longtemps avant de s'abattre, tandis que si on voulait le faire tenir droit, à l'état de repos, il tomberait de suite. Cela s'explique parce qu'aussitôt qu'il incline d'un côté, cette inclinaison lui fait décrire sur le sol une ligne courbe, d'où résulte une force centrifuge qui s'oppose à la chute du cerceau, tout le temps du moins qu'il conserve une vitesse suffisante.

30. **Aplatissement de la terre à ses pôles.** — Nous citerons encore un effet remarquable produit par la force centrifuge, c'est l'aplatissement de notre globe à ses deux pôles. Pour nous rendre compte de ce phénomène, observons que la terre, qui est sensiblement sphérique, tourne en vingt-quatre heures autour d'un axe fictif passant par ses deux pôles, et que dans ce mouvement de rotation tous les points de la surface terrestre ne sont pas animés de la même vitesse, car tous ne décrivent pas des chemins égaux. En effet, à l'équateur, ces points décrivent, en vingt-quatre heures, une circonférence égale à celle de la terre, tandis qu'en s'écartant de l'équateur ils décrivent des cercles de plus en plus petits jusqu'aux pôles, où leur mouvement est nul. On conçoit dès lors que, par suite du mouvement de rotation de la terre autour de son axe, il se produit une force centrifuge plus grande à l'équateur qu'en tout autre point de la surface terrestre, laquelle force s'affaiblit graduellement de l'équateur aux pôles où elle disparaît tout à fait. Cela posé, il est évident que, par l'effet même de cette inégalité dans l'intensité de la force centrifuge, les molécules terrestres ont dû affluer des pôles vers l'équateur, surtout si, comme l'admettent les géologues, toutes les matières qui composent le globe ont été primitivement à l'état liquide par l'effet d'une température élevée.

On a, en effet, constaté par le calcul et par des mesures directes que la terre est aplatie à ses pôles et renflée à l'équateur, mais d'une quantité peu considérable, car le rayon de la terre au pôle est plus petit que le rayon à l'équateur seulement de $\frac{1}{304}$ de ce dernier rayon, c'est-à-dire de près de 20 kilomètres. Le même aplatissement a été observé, à l'aide du télescope, sur les autres planètes.

Pour démontrer expérimentalement le renflement de la terre à l'équateur et son aplatissement aux pôles par l'effet de la force cen-

2.

trifuge, on fait usage de l'appareil représenté dans la figure 14. Il consiste en une tige de fer qui peut se fixer sur l'appareil à force centrifuge (fig. 13), à la place de la pièce AB. A la partie inférieure de la tige sont fixées quatre lames d'acier très-flexibles, lesquelles, à leurs extrémités supérieures, se réunissent à un anneau qui enveloppe la tige et peut glisser librement dans le sens de sa longueur. L'appareil étant ainsi disposé, aussitôt qu'on imprime à tout le système un mouvement de rotation rapide, on voit l'anneau descendre le long de la tige de fer, et les lames se courber davantage, comme le montre la figure ci-contre, ce qui démontre le renflement vers l'équateur et l'aplatissement aux pôles, mais d'une manière bien plus prononcée que pour le globe terrestre.

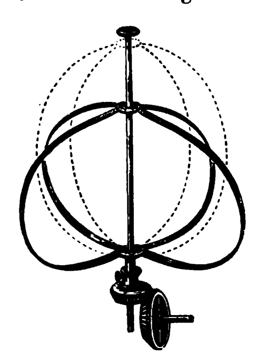


Fig. 14. — Aplatissement de la terre.

NOTIONS SUR LES LEVIERS.

31. **Mécanique, machines.** — La *mécanique* est la science qui traite des forces et du mouvement. Plusieurs forces étant appliquées à un même corps, elle fait connaître la relation qui doit exister entre ces forces pour qu'elles se fassent équilibre, ou pour qu'elles produisent un effet déterminé.

Tout appareil qui sert à transmettre l'action d'une force est une *machine;* et toute force qui fait mouvoir une machine est un *moteur*. Lorsqu'on coupe un fruit avec un couteau, la main est un moteur, et le couteau, qui transmet son action, est une machine. Un cheval, qui traîne une charrette, est un moteur, et la charrette, qui sert à utiliser la force du cheval pour le transport des fardeaux, est une machine. Le cours d'eau qui fait mouvoir une roue hydraulique, le vent qui fait tourner un moulin, la vapeur qui fait marcher une locomotive, sont des moteurs ; et la roue hydraulique, le moulin à vent, la locomotive, sont des machines.

Les machines n'augmentent pas l'énergie d'un moteur; mais, en modifiant son action, elles lui permettent d'exécuter des travaux qu'il ne pourrait faire seul. Par exemple, à l'aide du levier que nous allons décrire, un homme parvient à soulever des fardeaux

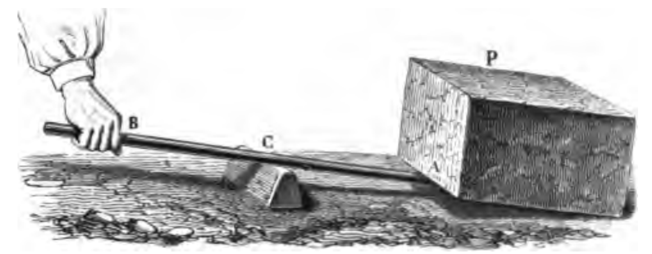


Fig. 15. — Levier du 1er genre.

qu'il lui serait complétement impossible de mouvoir sans le secours des machines. Nous ne considérerons ici que le levier, élément le plus simple des machines.

32. **Levier.** — Un *levier* est une barre de bois, ou de métal, mobile autour d'un point fixe qu'on appelle *point d'appui*, et sou-

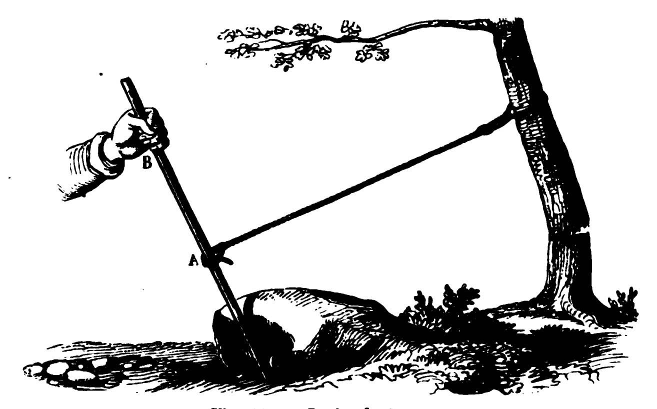


Fig. 16. — Levier du 2e genre.

mise à l'action de deux forces qui tendent à la faire tourner en sens contraire. Celle des deux forces qui agit comme moteur est la *puis-*

sance, l'autre est la ***résistance***. D'après la position relative de la puissance et de la résistance par rapport au point d'appui, on distingue trois genres de leviers :

1° *Levier du premier genre.* — Un levier est dit du premier genre quand le point d'appui est situé entre la puissance et la résistance. Tel est le levier représenté dans la figure 15. La main est la puissance, le poids P est la résistance, et C est le point d'appui ;

2° *Levier du second genre.* — Un levier est du deuxième genre lorsque la résistance est appliquée entre la puissance et le point d'appui, comme le montre la figure 16 ;

3° *Levier du troisième genre.* — Enfin, on appelle levier du

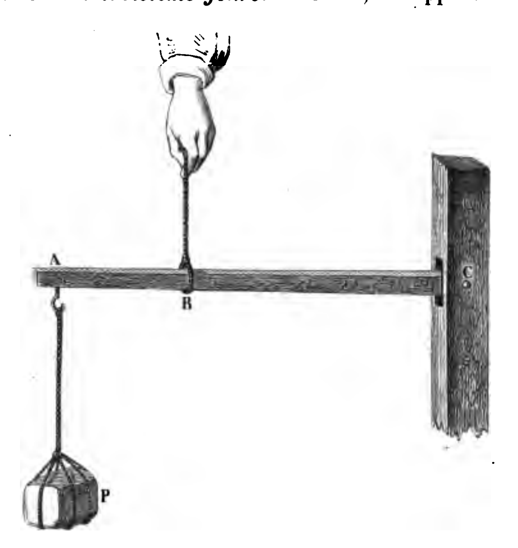


Fig. 17. — Levier du 3e genre.

troisième genre, celui dans lequel c'est la puissance qui est appliquée entre la résistance et le point d'appui, ainsi qu'on le voit dans la figure 17.

Dans les différents genres de leviers, les distances du point d'appui à la puissance et à la résistance, se nomment ***bras de levier***. Dans la figure 16, par exemple, la distance de C à B est le bras de

levier de la puissance, et celle de C à A est le bras de levier de la résistance.

33. **Effet des leviers, condition d'équilibre.** — On démontre, en mécanique, que l'effet que produit une force, à l'aide d'un levier, croît comme le bras de levier sur lequel elle agit, c'est-à-dire que si ce bras de levier est deux, trois, quatre fois plus long, l'effet utile produit est lui-même deux, trois, quatre fois plus considérable. C'est ce qui avait fait dire à Archimède, en parlant du levier, que si on lui donnait un point d'appui, il soulèverait le monde.

De ce qu'une force produit d'autant plus d'effet qu'elle agit sur un plus grand bras de levier, il résulte que, pour qu'il y ait équilibre entre la puissance et la résistance qui agissent en même temps sur un levier, il faut, si les bras de levier sont égaux, que *les deux forces soient elles-mêmes égales ;* et si les bras de levier sont inégaux, il faut que *les deux forces soient en raison inverse des bras de levier ;* c'est-à-dire que la puissance étant, par exemple, trois fois plus petite que la résistance, son bras de levier doit être trois fois plus grand que celui de cette dernière.

Il résulte de là que, dans le levier du troisième genre, la puissance est toujours plus grande que la résistance, car le bras de levier AC de cette dernière (fig. 17) est plus grand que le bras de levier BC de la puissance. Dans le levier du second genre, au contraire, la puissance est toujours plus petite que la résistance, car le bras de levier BC de la première est toujours plus grand que AC (fig. 16). On exprime ordinairement les propriétés de ces deux leviers, en disant que *le lévier du second genre fait gagner en force*, et que *celui du troisième genre fait perdre.* Quant au levier du premier genre, il peut faire perdre ou faire gagner, ou ne faire ni l'un ni l'autre, car le bras de levier BC de la puissance (fig. 15) peut être plus petit que AC, plus grand ou égal.

34. **Applications diverses des leviers.** — Les différents genres de leviers présentent de nombreuses applications dans une foule d'outils, d'appareils et de machines qui fonctionnent tous les jours sous nos yeux. La balance ordinaire, qui sera décrite bientôt, est un levier du premier genre. Il en est de même des brimbales des pompes. Les ciseaux dont on se sert pour couper les étoffes sont encore des leviers du premier genre : chaque branche des ciseaux est un levier

dont le point d'appui est la vis C, la puissance est la main, et la résistance est l'objet qu'il s'agit de couper (fig. 18).

Parmi les leviers du second genre, il faut placer les pincettes en usage dans nos foyers. La partie courbe de la pincette étant le point

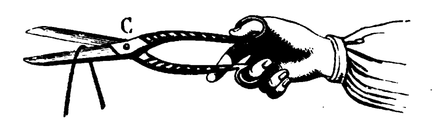


Fig. 18. — Exemple de levier du 1er genre.

d'appui, chaque branche est un levier du deuxième genre dont la puissance est la main qui tient la pincette, et la résistance est le charbon maintenu entre les deux branches. Les avirons des bateaux sont encore des leviers du second genre. La résistance de l'eau au mouvement de la palme de l'aviron représente le point d'appui, la main du batelier est la puissance, et le bateau qu'on fait avancer,



Fig. 19. — Exemple de levier du 2e genre.

ou plutôt l'eau qu'il déplace est la résistance. Le couteau fixé par un bout, dont on se sert dans les cuisines pour couper le pain, est un levier du second genre. Il en est encore de même du casse-noisette, comme on le reconnaît facilement à l'inspection de la figure 19.

Des trois espèces de leviers, c'est celui du troisième genre qu'on rencontre le plus rarement. Cependant, nous citerons, comme exemple de ce genre de levier, la pédale en usage dans les tours, dans les pianos, dans les rouets. Dans ce dernier appareil, la pédale consiste en une petite planchette de bois AB (fig. 20), formant levier. Le point d'appui est en C, sur le sol; la puissance, qui est le pied de la fileuse, est appliquée en B, et la résistance, qui est le mouvement à transmettre au rouet, est appliquée en A, à l'ex-

trémité de la pédale, par l'intermédiaire d'une tige qui s'articule à une manivelle coudée, fixée au centre de la roue qu'il s'agit de faire tourner. Mais les applications les plus fréquentes du levier du troi-



Fig. 20. — Exemple de levier du 3e genre.

sième genre se rencontrent dans les animaux, dont presque tous les mouvements ne s'effectuent que par ce mécanisme.

CHAPITRE IV

ATTRACTION UNIVERSELLE ET PESANTEUR.

35. **Attraction universelle.** — On rapporte que Newton, illustre physicien anglais, mort à Londres en 1727, étant un jour assis sous un pommier, dans son jardin, une pomme lui tomba sur la tête, et que ce fut là l'occasion qui, le portant à réfléchir sur la cause

de la chute des corps, lui fit découvrir les importantes lois de la gravitation universelle, qui régissent les mouvements de la terre et des astres.

Que l'histoire de cette pomme qui tombe soit vraie ou supposée, toujours est-il que c'est Newton qui, le premier, a reconnu qu'il existe entre tous les corps de l'univers une attraction réciproque, en vertu de laquelle ces corps tendent sans cesse les uns vers les autres, et que c'est par l'effet de cette force qu'un corps, aussitôt qu'il est abandonné à lui-même, se dirige vers la terre. De plus, comme à quelque hauteur que soit un corps dans l'atmosphère, il tend toujours à tomber, comme le montre la chute de la pluie et de la grêle, Newton en a conclu que l'attraction terrestre s'exerce à toutes les distances, même sur la lune, sur le soleil et sur les autres astres, et que cette force est réciproque entre tous les corps célestes, c'est-à-dire que de même que la terre attire un astre, elle en est attirée.

Quant aux lois suivant lesquelles s'exerce cette attraction, Newton a reconnu que celle-ci est d'autant plus intense que les corps ont plus de masse, c'est-à-dire renferment une plus grande quantité de matière ; et que, pour des corps de même masse, elle est en raison inverse du carré de la distance, c'est-à-dire que pour une distance deux, trois, quatre fois plus grande, l'attraction est quatre, neuf, seize fois moindre.

En résumant ce qui précède, la théorie de Newton sur l'attraction universelle peut donc s'énoncer ainsi :

1° *Il existe, entre tous les corps de la nature, une attraction réciproque qui s'exerce à toutes les distances, et en vertu de laquelle ils tendent toujours à se rapprocher.*

2° *L'attraction qui émane d'un corps croît, à distance égale, comme sa masse ; ou*, en d'autres termes, *est proportionnelle à sa masse.*

3° *Cette attraction, à masse égale, décroît comme le carré de la distance augmente ; ou*, ce qui est la même chose, *agit en raison inverse du carré de la distance.*

36. **Gravitation, son effet sur les mouvements des astres.** — On donne particulièrement le nom de *gravitation* à l'attraction qui s'exerce entre les astres. Le soleil étant de tous les corps

célestes de notre système planétaire celui qui a le plus de masse, c'est aussi celui qui exerce la plus grande attraction, d'où il semble que la terre et toutes les autres planètes devraient, en vertu de cette attraction, tomber sur le soleil. C'est, en effet, ce qui arriverait si la terre et les autres planètes n'étaient sollicitées que par la gravitation; mais, à l'origine des mondes, elles ont été lancées dans l'espace par le Créateur avec une vitesse immense, qui, par un effet d'inertie (19), tend constamment à les entraîner en ligne droite loin du soleil. C'est cette vitesse acquise qui, se combinant avec la gravitation, fait décrire aux planètes, autour du soleil, des courbes à peu près circulaires qu'on nomme leurs *orbites*.

37. **Pesanteur.** — La *pesanteur* est la force en vertu de laquelle les corps, dès qu'ils ne sont plus soutenus, *tombent*, c'est-à-dire se dirigent vers le centre de la terre. Cette force est un cas particulier de l'attraction universelle; elle a pour cause l'attraction réciproque qui s'exerce entre la terre et les corps placés à sa surface.

De même que la gravitation, la pesanteur agit sur les corps proportionnellement à leur masse, et en raison inverse du carré de la distance; c'est-à-dire qu'un corps qui contient deux, trois fois plus de matière qu'un autre, est deux, trois fois plus attiré par la terre, ou, en d'autres termes, pèse deux, trois fois davantage; mais qu'un même corps, qui s'écarterait de la terre, pèserait quatre ou neuf fois moins, s'il était deux ou trois fois plus éloigné de *son centre* et non de *sa surface;* car on démontre, en mécanique, que c'est à partir du centre même de la terre que doit être comptée la force attractive qu'elle exerce sur les corps pour les faire tomber.

Vu la grandeur du rayon terrestre, qui est, en moyenne, de près de 6 366 740 mètres, on peut regarder tous les corps situés à la surface de la terre comme étant très-sensiblement à la même distance de son centre, et en conclure que la différence de poids qu'ils présentent est due uniquement à leur différence de masse.

Enfin, la pesanteur agit également sur tous les corps, qu'ils soient en repos ou en mouvement, solides, liquides ou gazeux; et si quelques-uns, comme les nuages, la fumée, semblent se soustraire à cette force en s'élevant dans l'atmosphère au lieu de

tomber, on verra bientôt que c'est encore là un effet de la pesanteur.

38. **Verticale, horizontale.** — On nomme *verticale* la ligne droite que suivent les corps en tombant; c'est-à-dire la direction suivant laquelle agit la pesanteur. Cette ligne, prolongée, se dirige toujours sensiblement vers le centre de la terre. Il résulte de là, vu la grande distance de la surface de la terre à son centre, qu'en des points de cette surface *a* et *b* (fig. 21), peu distants les uns des autres, on peut admettre que les verticales sont parallèles; mais elles s'écartent d'autant plus du parallélisme que l'on considère

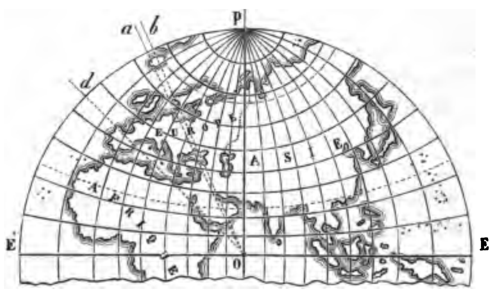


Fig. 21. — Verticales.

des points de la surface du globe plus éloignés les uns des autres, comme le montrent les verticales *a* et *d*.

En chaque point de la surface du globe, un homme, qui se tient debout, a le corps placé dans le sens de la verticale. Or, comme on vient de voir que la direction de celle-ci change constamment d'un lieu à un autre, il en est de même de la position des habitants des différentes contrées de notre globe; et celui-ci étant rond, il s'ensuit qu'en deux points diamétralement opposés, deux hommes se trouvent la tête en bas l'un par rapport à l'autre; de là, le nom d'*antipodes* (opposés par les pieds) donné aux habitants d'un lieu, par rapport aux habitants du lieu diamétralement opposé.

Une ligne droite, une surface plane, sont dites *horizontales* quand elles sont perpendiculaires à la direction de la verticale. La surface des eaux tranquilles est toujours parfaitement horizontale.

Nous verrons, en parlant du *niveau*, le moyen de reconnaître si une ligne, une surface sont horizontales.

39. **Fil à plomb, son usage.** — On nomme ***fil à plomb*** un petit instrument qui sert à déterminer la verticale, et qui consiste en un cylindre de plomb suspendu à un fil qu'on tient à la main. En obéissant à l'action de la pesanteur, ce cylindre entraîne le fil dans la direction de cette force, et lorsqu'il demeure en équilibre, c'est signe que le fil est exactement dirigé dans le sens de la verticale.



Fig. 22. — Fil à plomb.

Pour reconnaître, à l'aide du fil à plomb, si un objet quelconque, un mur, par exemple, est bien vertical, on a une petite plaque carrée, de cuivre, dont le côté égale le diamètre du cylindre de plomb. Cette plaque est percée à son centre d'un petit trou, dans lequel on passe le fil attaché au cylindre, puis tenant d'une main la plaque et de l'autre le fil, on applique le bord de la plaque contre le mur (fig. 22) ; si le cylindre s'applique alors exactement sur lui, cela indique qu'il est bien vertical ; si le cylindre ne touche pas le mur, c'est que celui-ci incline en avant ; le contraire a lieu si le cylindre touche encore le mur lorsqu'on éloigne un peu la plaque.

40. **Poids des corps.** — Le *poids* d'un corps est la somme des attractions partielles que la terre exerce sur chacune de ses molécules. On conclut de suite de là que le poids d'un corps doit croître comme sa masse; c'est-à-dire que s'il contient deux, trois fois plus de matière, il doit peser deux, trois fois davantage; c'est effectivement ce qui a lieu. On ne doit pas confondre le poids avec la pesanteur : celle-ci est la cause qui fait tomber les corps, le poids n'est que l'effet. On verra bientôt (45) comment le poids se reconnaît au moyen de la balance; quant à la pesanteur, elle se mesure par la vitesse qu'elle imprime aux corps qui tombent.

41. **Centre de gravité.** — On vient de voir que toutes les attractions partielles que la terre exerce sur chacune des molécules d'un corps équivalent à une force unique, qui est le poids du corps. Or, on démontre, en mécanique, qu'un corps de forme quelconque étant donné, cette force unique, ce poids, se trouve invariablement appliqué toujours à un même point du corps, dans quelque position qu'on place celui-ci. C'est ce point remarquable sur lequel agit constamment la résultante des actions de la pesanteur, dans toutes les positions que peut recevoir un corps, qu'on nomme son *centre de gravité.*

La détermination générale du centre de gravité d'un corps est du domaine de la géométrie; mais, dans beaucoup de cas, sa position peut se trouver immédiatement. Par exemple, dans une ligne matérielle, droite et homogène, il est évident que le centre de gravité doit être au milieu; dans un cercle, dans une sphère, il est au centre; dans un carré, il est au point où se rencontrent les deux diagonales.

42. **Équilibre des corps pesants.** — Le centre de gravité d'un corps étant le point où vient se concentrer toute l'action de la pesanteur, il en résulte que toutes les fois que ce point est soutenu par un appui quelconque, l'action de la pesanteur est détruite, et que, par suite, le corps demeure en équilibre. Or, il se présente ici plusieurs cas, suivant que le corps n'a qu'un seul point d'appui, ou qu'il en a plusieurs.

Dans le cas où le corps a un seul point d'appui, l'équilibre n'est possible qu'autant que le centre de gravité coïncide avec ce point, ou se trouve exactement au-dessous ou au-dessus, sur la même

verticale, car alors l'action de la pesanteur est nécessairement détruite par la résistance du point fixe par lequel passe cette force. On a un exemple de ce cas d'équilibre dans le fil à plomb (fig. 22), le centre de gravité étant alors au-dessous du point d'appui; et encore dans un bâton qu'on fait tenir debout sur un doigt, comme le montre la figure 23, dans laquelle la lettre g indique la



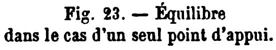


Fig. 23. — Équilibre dans le cas d'un seul point d'appui.



Fig. 24. — Équilibre dans le cas de deux points d'appui.

position du centre de gravité exactement au-dessus du point d'appui.

Si le corps a deux points d'appui, il n'est pas nécessaire, pour qu'il soit en équilibre, que son centre de gravité coïncide avec l'un de ces points, ou soit exactement au-dessous ou au-dessus; il suffit qu'il soit juste au-dessous ou au-dessus de la droite qui joint ces deux points; car il est évident que la pesanteur ne tend alors à le renverser ni d'un côté ni de l'autre de cette droite. Un homme monté sur deux échasses nous présente un exemple de ce cas d'équilibre (fig. 24).

*

Enfin, si un corps repose sur le sol par trois points d'appui (fig. 25), ou par un plus grand nombre, il y a équilibre toutes les fois que le centre de gravité se trouve au-dessus de la *base* formée par ces points d'appui, c'est-à-dire toutes les fois que la verticale abaissée du centre de gravité sur le sol passe entre les points d'ap-



Fig. 25. — Équilibre dans le cas de trois points d'appui.

pui ; car il est évident que la pesanteur ne peut alors renverser le corps en dehors de ses points d'appui, et qu'elle n'a pour effet que de l'appuyer sur le sol.

43. **Différents états d'équilibre.** — Lorsqu'un corps, qui n'est soumis qu'à l'action de la pesanteur, est soutenu par un ou plusieurs points d'appui, il peut se présenter trois cas d'équilibre : l'équilibre *stable*, l'équilibre *instable*, et l'équilibre *indifférent*.

1° *Équilibre stable.* — On dit qu'un corps est en équilibre stable lorsque, légèrement dévié de sa position d'équilibre, il y revient de lui-même. Cet état d'équilibre a lieu toutes les fois que le corps est dans une position telle que son centre de gravité se trouve plus bas qu'il ne serait dans toute autre position voisine de la première. En effet, il arrive alors qu'au moindre déplacement qu'on imprime au corps, son centre de gravité se trouve relevé. Or, comme la pesanteur agit constamment de haut en bas pour le faire descendre, elle le ramène nécessairement à sa première position, et, par conséquent, l'équilibre se rétablit.

On rencontre un exemple d'équilibre stable dans ces figurines de plâtre ou de carton qu'on nomme *poussas*, lesquelles se tiennent d'elles-mêmes en équilibre lorsqu'on les pose droites sur une table (fig. 26), et reviennent à cette position lorsqu'on les incline (fig. 27). Ces petites figures, qui sont creuses et légères, sont lestées, à leur partie inférieure, avec une masse d'argile ou

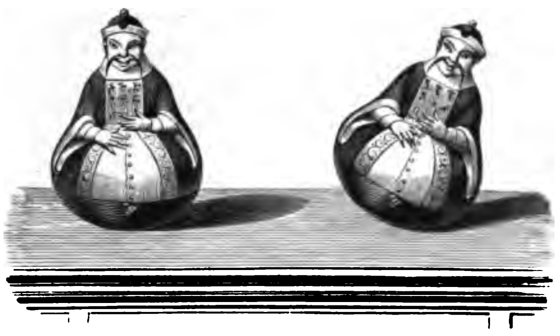


Fig. 26. Fig. 27.
Equilibre stable.

avec un peu de plomb, de manière que le centre de gravité *g* soit très-bas. Il résulte de là que, lorsqu'on incline la figure, le centre de gravité se trouve soulevé, et que dès lors la pesanteur le sollicitant à descendre, la figure revient à sa première position; ce qui n'a lieu toutefois qu'après un certain nombre d'oscillations à droite et à gauche de la position d'équilibre, oscillations dues à l'inertie de la matière, et dont l'explication est la même que celle qui sera donnée bientôt des oscillations du pendule (52).

2° *Équilibre instable.* — Un corps est en équilibre instable, lorsque tant soit peu dévié de sa position d'équilibre, non-seulement il n'y revient pas, mais s'en écarte de plus en plus. Cet état d'équilibre se présente lorsque le corps est placé de manière que son centre de gravité se trouve plus haut que dans toute autre position peu différente de celle d'équilibre. En effet, au moindre déplacement que prend le corps, son centre de gravité se trouvant abaissé, la pesanteur, qui agit de haut en bas, ne peut que l'abaisser davan-

tage, et le corps chavire tout à fait. On a un exemple d'équilibre instable dans le bâton qu'on fait tenir en équilibre sur un doigt (fig. 23). Aussitôt qu'il cesse d'être vertical, son centre de gravité descend, et la pesanteur l'abaissant de plus en plus, le bâton tombe, à moins qu'on n'ait soin de ramener le point d'appui au-dessous du centre de gravité, ce qui rétablit l'équilibre; mais c'est toujours un équilibre instable.

3° *Équilibre indifférent.* — Un corps est en état d'équilibre indifférent, lorsqu'il demeure en équilibre dans toutes les positions qu'on lui donne. Cet état d'équilibre ne peut avoir lieu qu'à la condition que le centre de gravité ne soit ni relevé ni abaissé lorsque le corps se déplace. C'est ce qui arrive, par exemple, pour une sphère qui repose sur une surface plane horizontale.

44. **Exemples d'équilibre stable.**— Il résulte de ce qui a été dit dans les deux paragraphes précédents, qu'un corps possède d'autant plus de stabilité, qu'il s'appuie sur le sol par une base plus large, car alors, même pour une inclinaison assez grande, son centre de gravité peut encore se trouver au-dessus de la base. Par exemple, les chandeliers, les lampes, les meubles et un grand nombre d'ustensiles, ne doivent leur stabilité qu'à l'étendue de leur base.

Tout le monde a entendu parler des tours de Pise et de Bologne, en Italie, qui sont tellement inclinées qu'elles semblent menacer les passants de leur chute, et qui, cependant, restent debout depuis des siècles, parce que leur centre de gravité est toujours au-dessus de leur base. La figure 28 représente la tour de Bologne, construite en 1112 et connue sous le nom de *Garisenda*. Cette tour, haute de cinquante mètres, et encore plus inclinée que celle de Pise, s'éloigne de la verticale de deux mètres et demi. On pense que cette inclinaison est due à un affaissement du sol. A côté, est la tour des *Azinelli :* c'est la plus haute de l'Italie.

Dans les exemples que nous avons considérés jusqu'ici, la position du centre de gravité est invariable pour chaque corps; il n'en est plus ainsi pour l'homme et pour les animaux, dont le centre de gravité se déplace constamment, selon les différentes attitudes qu'ils prennent, et les fardeaux dont ils sont chargés.

Quand un homme, ne portant aucun fardeau, se tient debout,

son centre de gravité est situé vers le milieu de la partie inférieure du bassin, c'est-à-dire entre les deux os des hanches. La verticale abaissée du centre de gravité passe alors entre les deux pieds. Mais il n'en est plus ainsi pour un homme qui porte un fardeau, car son

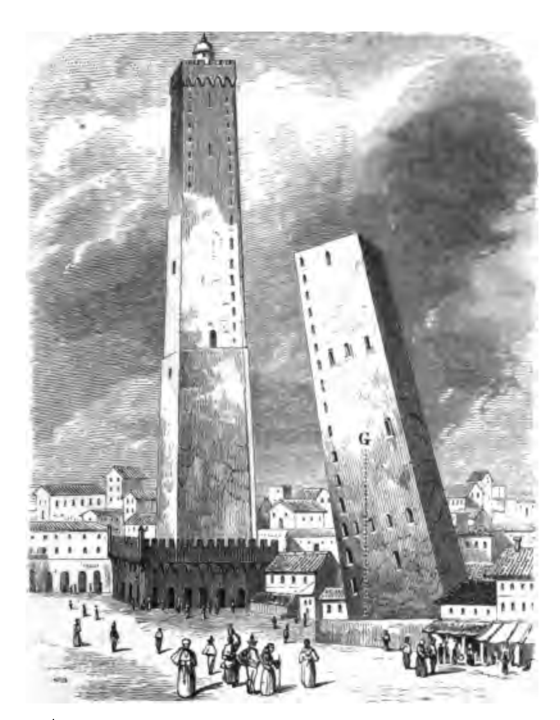


Fig. 28. — Tour de Bologne.

propre poids se réunissant à celui qu'il porte, il en résulte un centre de gravité commun qui n'est ni celui du corps de l'homme ni celui du fardeau.

Dans ce cas, pour conserver sa stabilité, l'homme doit prendre une attitude qui maintienne son centre de gravité au-dessus de la base formée par ses deux pieds. C'est pour cette raison qu'un colporteur qui porte un lourd fardeau sur le dos est obligé de se pen-

cher en avant (fig. 29). Au contraire, un homme incommodé d'un gros ventre est contraint de se pencher en arrière. Celui qui porte un fardeau d'une main, éprouve la nécessité d'incliner son corps du côté opposé (fig. 30).

Dans l'art du danseur de corde, la difficulté consiste à maintenir exactement le centre de gravité au-dessus de la corde. Pour obtenir plus facilement ce résultat, on voit ceux qui se livrent à cet exercice tenir à la main un long balancier de bois. Aussitôt qu'ils



Fig. 29. Fig. 30.

Attitudes nécessaires à la stabilité.

se sentent incliner dans une direction, ils avancent le balancier dans la direction opposée, et comme le centre de gravité commun au balancier et aux danseurs se déplace en même temps, ceux-ci parviennent à maintenir ce point au-dessus de la corde, et, par suite, à conserver leur équilibre.

45. **Balances.** — On nomme *balances* des appareils destinés à faire connaître le poids des corps. Ces appareils, qui sont d'un usage continuel dans les relations commerciales, dans les manufactures, dans les laboratoires des physiciens et des chimistes, ont reçu des formes variées. Nous ne décrirons ici que la balance ordinaire qu'on rencontre sur les comptoirs des marchands.

Cette balance se compose d'une barre métallique AB, nommée

fléau (fig. 31), qui n'est autre chose qu'un levier du premier genre. Ce fléau est traversé, en son milieu, par un axe triangulaire *n*, en acier trempé, qu'on appelle le *couteau;* celui-ci, faisant



Fig. 31. — Balance du commerce.

saillie des deux côtés du fléau, s'appuie, à ses extrémités, sur deux supports portés eux-mêmes sur une longue colonne de cuivre. Ces supports sont en acier trempé et poli, afin de rendre le frottement plus doux lorsque la balance oscille. Aux deux bouts du fléau sont

suspendus, à l'aide de crochets et de cordeaux, deux *plateaux* ou *bassins* C et D, destinés à recevoir, l'un les objets que l'on veut peser, l'autre les grammes et multiples du gramme dont on se sert comme unités de poids. Enfin, à la partie supérieure du fléau est fixée une longue aiguille métallique, qui oscille avec lui devant un petit cadran *a*, au milieu duquel elle doit correspondre quand le fléau est bien horizontal.

Cela posé, pour déterminer avec la balance le poids d'un corps, on place ce dernier dans l'un des plateaux, dans le plateau D, par exemple, et dans l'autre on met des poids jusqu'à ce que l'équilibre s'établisse, c'est-à-dire jusqu'à ce que le fléau soit parfaitement horizontal. Le nombre de grammes qui se trouvent alors dans le plateau C indique le poids du corps, autant, toutefois, que la balance satisfait aux conditions suivantes.

46. **Conditions auxquelles doit satisfaire une bonne balance.** — Pour obtenir des pesées exactes avec une balance, il faut que celle-ci remplisse les conditions que nous allons faire connaître.

1° Les bras de levier A*n* et B*n* du fléau doivent être rigoureusement égaux. En effet, on a vu, dans la théorie du levier (33), que, pour qu'il y ait équilibre lorsque la puissance et la résistance sont égales entre elles, il faut que les bras de levier sur lesquels agissent ces forces soient eux-mêmes égaux. Par conséquent, les grammes placés dans l'un des plateaux ne peuvent représenter exactement le poids du corps placé dans l'autre, qu'à la condition que les bras de levier A*n* et B*n* soient parfaitement égaux entre eux.

2° Il faut que la balance soit *sensible*, c'est-à-dire qu'elle oscille même pour une très-petite différence de poids dans les deux plateaux. C'est pour obtenir ce résultat que le couteau et ses supports doivent être en acier poli et trempé, afin de rendre le frottement de ces deux pièces l'une sur l'autre le plus doux possible. On ajoute encore à la sensibilité de la balance, en donnant à l'aiguille *na* une plus grande longueur, car alors une légère inclinaison du fléau est plus apparente.

3° Enfin, il est nécessaire que le centre de gravité du fléau soit un peu au-dessous du couteau. S'il coïncidait avec l'arête de celui-ci, et, par suite, avec le point d'appui, le centre de gravité

serait soutenu dans toutes les positions où l'on placerait le fléau; dès lors celui-ci serait toujours en état d'équilibre indifférent, et ne pourrait osciller. Si le centre de gravité était au-dessus du point d'appui, le fléau ne pourrait prendre qu'un équilibre instable (43), et une fois déplacé de sa position horizontale, il lui serait impossible d'y revenir, ce qu'on exprime en disant que la balance est *folle*.

Il est à remarquer que plus les plateaux sont chargés, plus le frottement du couteau sur les points d'appui est considérable. La balance perd donc alors de sa sensibilité. C'est pourquoi une balance de précision doit être aussi légère que possible, et ne peut conserver sa précision que pour de faibles poids.

47. **Moyen de vérifier si les deux bras du fléau sont égaux; méthode des doubles pesées.** — De ce que le fléau d'une balance conserve l'horizontalité quand les bassins sont vides, on ne peut conclure que ses deux bras soient rigoureusement égaux, car l'un d'eux étant plus long que l'autre, il suffit de lui donner un bassin un peu plus léger que celui suspendu au second bras, pour que l'équilibre subsiste. Mais, par le procédé suivant, il est facile de reconnaître si les deux bras du fléau sont ou ne sont pas de même longueur. On place, dans un des plateaux, un objet quelconque, et, dans l'autre, des poids jusqu'à ce que l'équilibre s'établisse. Puis, portant l'objet dans le plateau où sont les poids, et ceux-ci dans le plateau où était l'objet, on voit s'il y a encore équilibre, c'est-à-dire si le fléau demeure horizontal : dans ce cas, la balance est exacte; au contraire, si l'équilibre se trouve rompu, la balance est fausse. En effet, quand les deux bras du fléau sont rigoureusement égaux, il en est nécessairement de même des deux poids qui se font équilibre, et alors peu importe que l'objet à peser soit dans un plateau ou dans l'autre. Tandis que si les bras du fléau sont inégaux, il en est de même des poids, et comme c'est d'abord au plus petit bras du fléau que correspond le plus fort poids, et au plus grand bras que correspond le plus faible, il s'ensuit que l'inverse a lieu lorsqu'on change de plateaux le corps à peser et les poids qui lui font équilibre, et que, par suite, l'équilibre devient impossible.

Cependant, on peut, avec une balance dont les deux bras du fléau sont inégaux, obtenir des pesées exactes par la méthode suivante,

connue sous le nom de ***méthode des doubles pesées*** ou ***méthode de Borda***. On place, dans l'un des plateaux, le corps dont on veut connaître le poids, et, dans l'autre, on lui fait équilibre avec de la grenaille de plomb qu'on verse lentement dans une petite capsule, jusqu'à ce que l'équilibre s'établisse. Retirant alors du premier plateau l'objet à peser, on met à sa place des poids jusqu'à ce que le fléau redevienne horizontal. Le nombre de grammes ainsi obtenu représente bien le poids de l'objet, puisque ces grammes agissent sur le même bras de levier que lui pour faire équilibre à la même résistance, le poids de la grenaille.

CHAPITRE V

LOIS DE LA CHUTE DES CORPS, PLAN INCLINÉ, PENDULE.

48. **Lois de la chute des corps dans le vide.** — Lorsque les corps tombent dans le vide, c'est-à-dire sans renconter aucune résistance, leur chute est soumise aux trois lois suivantes :

1° *Tous les corps tombent également vite.*

2° *La vitesse acquise par un corps qui tombe est proportionnelle à la durée de sa chute;* c'est-à-dire que si au bout d'une seconde la vitesse est 9^{m},8, au bout de deux secondes, elle sera 19^{m},6; au bout de trois secondes, elle sera 29^{m},4, et ainsi de suite.

3° *L'espace que parcourt un corps qui tombe est proportionnel au carré du temps pendant lequel il est tombé;* c'est-à-dire que si l'espace parcouru en une seconde est 4^{m},9, l'espace parcouru pendant deux secondes sera quatre fois plus grand, ou 19^{m},6; de même, l'espace parcouru pendant trois secondes sera neuf fois plus grand, ou 44^{m},1, et ainsi de suite.

La première loi se vérifie par l'expérience suivante : on prend un tube de verre de deux mètres de longueur environ, fermé à ses deux extrémités, mais muni à l'une d'elles d'un robinet qui permet d'en retirer l'air et de l'y faire rentrer à volonté (fig. 32). On

introduit dans ce tube une petite balle de plomb, puis quelque corps léger, comme une barbe de plume. Tant que le tube est plein d'air, on voit, en le retournant brusquement, la balle de plomb tomber bien plus rapidement que la plume. Mais si, vissant le robinet sur la pompe à faire le vide dont il a déjà été question (40), on retire l'air qui est dans le tube, puis qu'on dévisse celui-ci après avoir fermé le robinet, et qu'on le retourne de nouveau brusquement, comme le montre la figure ci-contre, on remarque que la boule de plomb et la barbe de plume tombent exactement avec la même vitesse. On conclut de là que l'attraction terrestre, qui est la cause de la chute des corps, s'exerce également sur toutes les substances, et que la différence de vitesse que nous offrent les corps dans leur chute provient uniquement de la résistance de l'air, résistance d'autant plus sensible que les corps ont moins de masse et présentent à l'air une plus grande surface.


Fig. 32. — Chute dans le vide.

La seconde loi de la chute des corps est une conséquence de leur inertie et de la continuité d'action de la pesanteur pour les faire tomber, car c'est parce que la vitesse imprimée au mobile pendant la première seconde s'ajoute à celle communiquée pendant la première, qu'au bout de deux secondes la vitesse se trouve doublée; et ainsi de suite, au bout de trois, quatre secondes. Quant à la troisième loi, on va voir ci-après (50) comment elle se démontre à l'aide du plan incliné.

49. **Plan incliné.** — Toute surface plane plus ou moins oblique par rapport à un plan horizontal, est un *plan incliné*. Telle est la surface AB (fig. 33); tel est encore le dessus d'un pupitre dont on se sert pour écrire.

Quand un corps repose sur un plan horizontal, l'action de la

pesanteur se trouve entièrement détruite par la résistance de ce plan; c'est ce qui arrive, par exemple, pour un vase posé sur une table. Or, il n'en est plus ainsi lorsqu'un corps s'appuie sur un plan incliné; l'action de la pesanteur se décompose alors en deux forces (25), l'une perpendiculaire au plan incliné, c'est-à-dire agissant contre sa surface même; l'autre parallèle au plan. La première force ne fait que comprimer le corps sur le plan, sans lui commu-

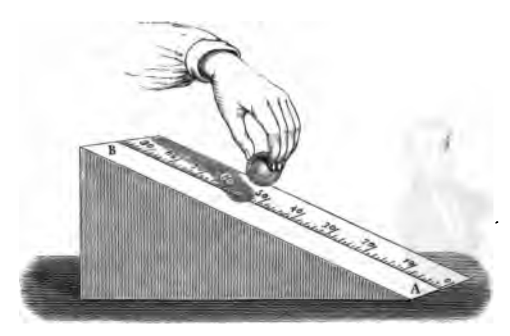


Fig. 33. — Plan incliné.

niquer aucun mouvement, tandis que la seconde fait descendre le corps le long du plan incliné. Or, cette dernière force n'est qu'une composante de la pesanteur; elle n'en est qu'une fraction, un tiers, un quart, par exemple, selon que le plan est plus ou moins incliné. Par conséquent, un corps posé sur un plan incliné doit descendre le long de ce plan, mais plus lentement que s'il tombait librement suivant la verticale; c'est, en effet, ce qui a lieu, et la vitesse est d'autant plus faible que le plan fait avec l'horizon un angle plus petit.

50. **Démonstration de la troisième loi de la chute des corps par le plan incliné.** — La propriété qu'a le plan incliné de ralentir la chute des corps autant qu'on le veut, a été utilisée pour démontrer cette troisième loi de la chute des corps (48), que ***l'espace parcouru par un corps qui tombe est proportionnel au carré du temps pendant lequel il est tombé.***

Pour faire cette expérience, on prend un plan incliné AB (fig. 33),

le long duquel est tracée une échelle graduée en centimètres; puis, prenant à la main une boule de cuivre bien polie, on cherche, par tâtonnement, à quel point de l'échelle il faut la placer pour qu'elle mette d'abord une seconde à atteindre la base du plan incliné, c'est-à-dire l'extrémité A; soit à la onzième division, par exemple.



Fig. 34. — Application du plan incliné pour gravir les côtes.

Recommençant ensuite l'expérience, on pose la boule de manière à lui faire parcourir une distance quatre fois plus grande, c'est-à-dire qu'on la pose à la quarante-quatrième division, et on trouve qu'elle met alors deux secondes à descendre. Si on lui fait parcourir un espace neuf fois plus grand que la première fois, c'est-à-dire quatre-vingt-dix-neuf divisions, on voit qu'il lui faut pour cela trois secondes. On clonclut de là que les espaces parcourus croissent bien comme les carrés des temps.

51. **Autres applications du plan incliné.** — Lorsqu'une masse quelconque repose sur un plan incliné, l'action de la pesanteur pour la faire descendre le long de ce plan, étant d'autant plus faible qu'il approche davantage d'être horizontal (49), il en résulte que l'effort nécessaire pour élever un fardeau sur un plan incliné, est d'autant moindre que celui-ci fait avec l'horizon un plus

petit angle. Cette propriété est souvent utilisée pour élever de lourds fardeaux qu'on ne pourrait faire monter dans le sens de la verticale, mais qu'on parvient facilement à élever le long d'un plan incliné. Par exemple, pour charger une barrique de vin sur une charette, on voit les rouliers incliner vers le sol la partie postérieure du brancard, et celui-ci faisant alors l'office de plan incliné, ils roulent dessus, sans beaucoup d'effort, la barrique qu'il s'agit de charger.

La propriété du plan incliné est encore utilisée pour faire monter les hommes et les animaux sur les coteaux escarpés. On trace sur le versant de ceux-ci une route sinueuse, formée d'une suite de plans inclinés (fig. 34), et on rend ainsi accessibles, même aux voitures, des sommets de montagnes qui autrement ne pourraient être gravis.

Enfin, si l'eau s'écoule dans les ruisseaux, dans les rivières, c'est parce que leur lit est un plan incliné, et plus l'inclinaison est grande, plus le courant est rapide.

52. **Pendule.** — On nomme *pendule* toute masse pesante suspendue à un fil mobile autour d'un point fixe, ou à une tige métallique mobile autour d'un axe horizontal. La boule *m* suspendue à un fil C*m*, dont l'extrémité supérieure est fixe en C (fig. 35), est un pendule.

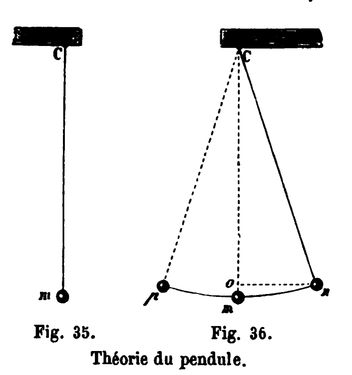


Fig. 35. Fig. 36.
Théorie du pendule.

Tant que le fil est vertical, ce qui a lieu tant que le centre de gravité de la boule est exactement au-dessous du point de suspension C, le pendule demeure en équilibre, car l'action de la pesanteur se trouve détruite par la résistance de ce point. Or, il n'en est plus ainsi, lorsqu'on écarte le pendule de sa position verticale, et qu'on le place, par exemple, dans la direction C*n* (fig. 36). La boule ayant été relevée, la pesanteur agit aussitôt pour la faire redescendre; elle revient donc de *n* en *m*, et arrive en ce dernier point précisément avec la même vitesse

qu'elle aurait si elle était tombée, suivant la verticale, de la hauteur *om*. Par suite, la boule ne s'arrête pas en *m*, mais, en vertu de son inertie et de sa vitesse acquise, elle continue à se mouvoir dans la direction *mp*; toutefois, comme ici la boule remonte, la pesanteur, qui de *n* en *m* a agi comme force accélératrice, agit maintenant comme force retardatrice, car elle agit en sens contraire du mouvement; il en résulte que celui-ci se ralentit, et que la boule s'arrête à une distance *mp*, qui serait rigoureusement égale à *mn*, si ce n'était la résistance de l'air et aussi la roideur du fil C*m*, qui, tout mince qu'il est, offre cependant une certaine résistance à se fléchir au point C, pour passer de la position C*n* à la position C*p*, et réciproquement.

Cela posé, à l'instant où la boule s'arrête en *p*, la pesanteur agissant aussitôt pour la faire retomber, la ramène de *p* en *m*, d'où, entraînée par sa vitesse acquise, elle remonte sensiblement jusqu'en *n*, et ainsi de suite, en sorte qu'il se produit, de *n* vers *p* et de *p* vers *n*, un mouvement de va-et-vient qui peut durer plusieurs heures.

Ce mouvement se désigne sous le nom de *mouvement oscillatoire*. L'allée de la boule du point *n* au point *p*, ou réciproquement, constitue une *oscillation simple* du pendule; l'allée de *n* en *p* et le retour de *p* en *n* constituent une *oscillation double ;* enfin, on nomme *amplitude* des oscillations l'écart entre les deux positions extrêmes C*n* et C*p*, amplitude qui est mesurée par l'arc *pn*.

53. **Pendule simple et pendule composé.** — On distingue, en physique, deux sortes de pendules, le *pendule simple* et le *pendule composé*. Le pendule *simple* serait celui qui serait formé d'un *seul* point matériel suspendu à un fil *sans* pesanteur. Un pareil pendule ne peut évidemment se réaliser; aussi ne l'a-t-on considéré que pour arriver théoriquement aux lois des oscillations du pendule, lois que nous ferons connaître ci-après.

On nomme pendule *composé* tout corps qui peut osciller autour d'un point ou autour d'un axe. Le pendule qui a été considéré ci-dessus (fig. 35) est un pendule composé. On peut en varier beaucoup la forme; mais, en général, il consiste en une tige d'acier T (fig. 38), fixée, par sa partie supérieure, à une lame d'acier *a*, mince et flexible ; à sa partie inférieure, la tige se ter-

mine par un disque de laiton L, bombé sur ses deux faces, et lesté à l'intérieur avec du plomb. Ce disque est appelé *lentille*, à cause de l'analogie de sa forme avec la graine de ce nom. Cette forme lenticulaire est préférée à la forme sphérique, parce qu'elle offre moins de résistance à l'air pendant chaque oscillation.

54. **Lois des oscillations du pendule.** — Quelle que soit la forme d'un pendule, ses oscillations présentent toujours les quatre lois suivantes, dont on verra ci-après les applications :

1° Pour des pendules d'inégales longueurs, *la durée des oscillations est proportionnelle à la racine carrée de la longueur du pendule.*

2° Pour un même pendule, *la durée des oscillations est indépendante de leur amplitude*, autant toutefois que cette amplitude ne dépasse pas une certaine limite.

3° Pour des pendules de même longueur, mais de matières différentes, *la durée des oscillations est indépendante de la substance dont ces pendules sont formés ;* c'est-à-dire qu'ils soient de plomb, de cuivre, d'ivoire, de bois, tous oscillent dans le même temps.

4° Pour un même pendule, *la durée des oscillations est en raison inverse de la racine carrée de l'intensité de la pesanteur dans le lieu où est le pendule.*

Toutes ces lois ont été découvertes par le calcul en considérant le pendule simple ; mais on peut les vérifier par l'expérience, en prenant un pendule composé qui diffère le moins possible du pendule simple, ce qu'on réalise assez bien en suspendant une petite boule de plomb ou de platine à un fil de soie très-fin. Pour vérifier la première loi avec ce pendule, on commencera par le faire osciller, et par observer combien il fait d'oscillations en une minute : supposons qu'il en fasse 72. Raccourcissant ensuite le fil, de manière que sa longueur soit quatre fois moindre, et faisant osciller le nouveau pendule, on trouve qu'il fait alors 144 oscillations par minute, c'est-à-dire deux fois plus ; ce qui indique que leur durée est deux fois moindre, et ce qui vérifie la loi, puisque 2 est la racine carrée de 4. On trouve de même qu'en rendant le fil neuf fois plus court, la durée des oscillations est trois fois plus petite.

Pour vérifier la deuxième loi, on fait osciller un même pendule de manière que l'amplitude de ses oscillations soit d'abord égale à *qr*, puis ensuite à *pn* (fig. 37), et, dans les deux cas, le nombre des oscillations par minute est le même, ce qui montre bien que la durée des oscillations est indépendante de leur amplitude; toutefois, cette loi n'est exacte que pour des amplitudes de quelques degrés seulement, c'est-à-dire très-petites.

Cette propriété que la durée des petites oscillations est toujours la même, quoique leur amplitude soit un peu plus ou un peu moins grande, se désigne sous le nom d'*isochronisme* du pendule, de deux mots grecs qui signifient *temps égal*, et les oscillations qui s'effectuent ainsi en temps égaux sont dites *isochrones*. C'est Galilée, illustre physicien et astronome italien, qui, le premier, vers la fin du XVIe siècle, découvrit l'isochronisme des petites oscillations du pendule. On rapporte que, fort jeune encore, il fit cette découverte en observant les mouvements d'une lampe suspendue à la voûte de la cathédrale de Pise.

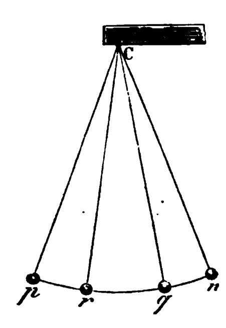


Fig. 37. — Isochronisme.

55. **Applications des lois précédentes.** — 1° L'isochronisme des oscillations du pendule l'a fait appliquer comme régulateur aux horloges. C'est Huyhens, physicien hollandais, qui, le premier, fit cette application, en 1657. La figure 38 représente le mécanisme à l'aide duquel le pendule sert à régler le mouvement des pendules ordinaires. Le moteur de ces dernières est, comme on sait, un ressort qui s'enroule en spirale quand on les monte avec une clef, et qui, en se déroulant ensuite lentement, fait marcher toutes les pièces pendant quinze ou vingt jours. Or, on conçoit que sans un obstacle qui s'oppose à la détente du ressort, celui-ci se déroulerait avec une grande vitesse et ne pourrait dès lors être utilisé pour entretenir le mouvement. Il s'agit donc, tout en laissant le ressort agir comme moteur, de ne lui permettre de se dérouler que lentement et surtout uniformément. Pour cela, on fait dépendre tout le mouvement d'horlogerie d'une roue R qu'on nomme *roue de rencontre*, et qui dépend elle-même du pendule T.

A cet effet, celui-ci, en oscillant, transmet son mouvement à une ourchette A, à laquelle est adaptee une tige B, mobile à son extrémité supérieure autour d'un axe horizontal O. A ce même axe est fixée une pièce *mn*, qu'on nomme *échappement à ancre*, et qui se termine, à ses deux bouts, par deux palettes *m* et *n*, destinées à engrener dans les dents de la roue R. Celle-ci tendant à tourner dans le sens marqué par la flèche, on voit qu'une de ses dents butte contre la palette *m*, ce qui arrête non-seulement le mouvement de la roue R, mais celui de toutes les pièces de la pendule. Or, le pendule T oscillant de droite à gauche, la palette *m* est soulevée et la roue tourne, mais seulement d'une dent, car la palette *n*, en s'inclinant, vient à son tour butter contre une dent et arrêter de nouveau la roue. Le pendule revenant maintenant de gauche à droite, la palette *n* lâche la dent qu'elle retenait, et c'est l'autre palette qui vient arrêter encore la roue de rencontre, et ainsi de suite, en sorte qu'à chaque oscillation cette roue avance d'une dent seulement. Or, ces oscillations se faisant toutes en temps égaux, il en résulte que la roue de rencontre et, par suite, tout le mouvement d'horlogerie marchent et s'arrêtent successivement à des intervalles de temps rigoureusement égaux, et indiquent, dès lors des divisions égales du temps.



Fig. 38. — Pendule avec échappement à ancre.

Il découle de ce qui précède que pour régler une horloge, quand elle avance ou retarde, il suffit d'allonger ou de raccourcir le pen-

dule qui lui sert de régulateur. Pour cela, la lentille L n'est pas fixée à la tige, mais peut glisser dans le sens de sa longueur en s'élevant ou s'abaissant à l'aide d'une vis *v*, suivant qu'on tourne celle-ci dans un sens ou dans l'autre. Si l'horloge retarde, c'est que le pendule oscille trop lentement, et, par conséquent, est trop long ; il faut donc le raccourcir, ce qui se fait en remontant la lentille; on l'abaisse, au contraire, quand l'horloge avance. Dans les pendules ordinaires, on allonge ou raccourcit aussi le pendule lorsqu'il s'agit de les retarder ou de les avancer, mais cet allongement ou ce raccourcissement se fait à l'extrémité supérieure du pendule en faisant varier la portion oscillante de la lame *a*, à l'aide d'une pièce mobile qui pince cette lame et qu'on peut élever ou abaisser à volonté. Cette pièce n'est pas figurée dans notre dessin.

2° D'après la relation que la quatrième loi des oscillations du pendule établit entre la durée de ses oscillations et l'intensité de la pesanteur, le pendule a encore servi à mesurer l'intensité de la pesanteur sur les différents points du globe, et à constater qu'elle va en croissant de l'équateur au pôle. Le même instrument a permis de calculer avec précision la vitesse qu'acquièrent les corps en tombant dans le vide, vitesse qui, au bout d'une seconde de chute, à Paris, est de 9^m, 8088.

3° Enfin, un des plus célèbres physiciens de notre époque, M. Léon Foucault, a fait, il y a un petit nombre d'années, une remarquable application du pendule à la démonstration expérimentale du mouvement diurne de la terre autour de son axe. La théorie de cette expérience ne peut être comprise sans des connaissances assez élevées en mécanique ; mais M. Froment, non moins habile comme physicien que comme constructeur d'instruments de précision, a imaginé récemment un petit appareil qui rend la belle expérience de M. Foucault accessible à tous. Cependant, il faut voir marcher cet appareil, une description serait encore obscure.

56. **Métronome.** — Le *métronome* est encore une application de l'isochronisme des oscillations du pendule. On sait que cet appareil n'est autre chose qu'un petit pendule dont se servent les personnes qui étudient la musique pour marquer la vitesse des morceaux qu'elles exécutent ; mais comme cette vitesse varie avec les différentes pièces de musique, il importe de pouvoir varier la du-

rée des oscillations. Pour cela, le pendule étant terminé par une boule de plomb B (fig. 39), et oscillant autour d'un axe *o*, la tige, qui se prolonge au-dessus de cet axe, est chargée, à sa partie supérieure, d'un poids A, qui peut glisser à frottement doux le long de la tige, et s'élever plus ou moins. Or, ce poids contrarie évidemment les oscillations de la boule B, car lorsque celle-ci tend à osciller, par exemple, de droite à gauche, le poids tend à osciller en sens contraire, et cette résistance qu'il présente au mouvement de la boule est d'autant plus grande qu'il agit sur un plus grand bras de levier A*o*. Par suite, plus on relève le poids A, plus les oscillations du métronome sont lentes. A la partie inférieure de l'instrument est un mouvement d'horlogerie qui fait marcher une roue de rencontre avec assez de force pour qu'à chaque oscillation du pendule, une dent frappe fortement sur une palette fixée à l'axe *o*, d'où résulte un choc régulier qui donne la mesure. Enfin, en avant de la boîte qui contient tout le mécanisme, est une échelle portant des numéros qui indiquent à quelle hauteur il faut placer le poids pour obtenir, par minute, un nombre d'oscillations déterminé. Dans le dessin, le poids est à la hauteur du nombre 92, ce qui indique que le pendule fait 92 oscillations par minute.

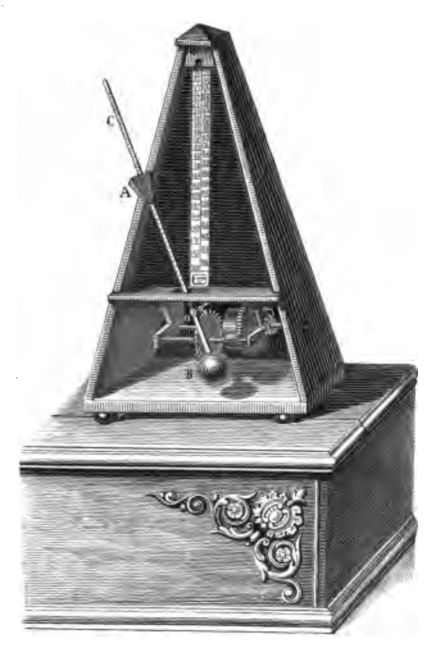


Fig. 39. — Métronome.

CHAPITRE VI

ATTRACTION MOLÉCULAIRE ET PHÉNOMÈNES QUI EN DÉPENDENT.

57. **Cohésion et affinité.** — Après avoir fait connaître, sous le nom de *gravitation universelle*, l'attraction qui existe entre les astres; sous celui de *pesanteur*, l'attraction que la masse terrestre exerce sur les corps pour les faire tomber, il nous reste à étudier l'attraction qui lie entre elles les dernières molécules des corps (4). Cette force, qui n'agit qu'à des distances infiniment petites, se designe tantôt sous le nom de *cohésion*, tantôt sous celui d'*affinité*.

La *cohésion* est l'attraction qui s'exerce entre deux molécules d'une même substance, par exemple, entre deux molécules de fer, entre deux molécules de soufre; tandis que l'*affinité* est l'attraction qui lie entre elles deux molécules de substances différentes. Par exemple, l'eau étant formée d'oxygène et d'hydrogène, c'est l'affinité qui unit une molécule d'oxygène à une ou plusieurs molécules d'hydrogène. De même, le sucre étant composé d'oxygène, d'hydrogène et de carbone, la force en vertu de laquelle ces trois corps se combinent pour former une molécule de sucre, est encore l'affinité. Cette force, quoique n'agissant que sur les dernières molécules des corps, joue un rôle immense dans la nature. C'est elle, en effet, qui, déterminant la combinaison des corps simples, forme, avec un petit nombre d'entre eux, le nombre immense de produits organiques ou minéraux qui servent à nos usages journaliers; car ces corps sont souvent composés des mêmes substances, et ne diffèrent que par la quantité qu'ils en contiennent. Un peu plus ou un peu moins de carbone, d'hydrogène ou d'oxygène, suffit pour former des composés entièrement dissemblables.

Quand du sucre ou un sel se dissout dans l'eau, c'est l'affinité mutuelle qui s'exerce entre ces substances et le liquide, qui détermine la dissolution. Lorsque du charbon brûle, c'est l'affinité qui fait que ce corps se combine à l'oxygène de l'air pour donner

naissance au gaz connu, en chimie, sous le nom d'acide carbonique.

La force répulsive que la chaleur fait naître entre les molécules des corps (4) diminue la cohésion; c'est pour cela que, lorsqu'il s'agit de forger les métaux, on commence par les chauffer au rouge, afin de les rendre plus malléables. Quant à l'affinité, tantôt elle s'affaiblit par l'action de la chaleur, tantôt elle augmente. Chauffées fortement, toutes les substances végétales et animales sont décomposées par la chaleur, leurs éléments se séparent, ce qui prouve que l'affinité est vaincue par la force répulsive qui s'exerce entre les molécules. Au contraire, beaucoup de substances qui, comme le carbone et l'oxygène, le soufre et le fer, ne peuvent se combiner à froid, se combinent très-rapidement à chaud, ce qui indique que l'affinité est augmentée, effet qui résulte de ce que la chaleur, en écartant les molécules, diminue la cohésion qui les unit et permet ainsi aux molécules des substances en présence d'obéir plus facilement à leur affinité réciproque.

58. **Adhérence.** — On appelle *adhérence* une attraction qui se manifeste entre deux corps lorsque leurs surfaces ont été mises en contact. Par exemple, on a souvent observé que deux glaces superposées finissent par adhérer tellement qu'on ne peut plus les séparer sans les rompre. C'est là, évidemment, un effet de l'attraction qui s'exerce entre les molécules des deux glaces.

L'adhérence croît avec le degré de poli des surfaces et avec la durée de leur contact; elle est indépendante de l'épaisseur des corps, ce qui montre qu'elle n'agit qu'à de très-petites distances, comme toutes les forces moléculaires. C'est à l'adhérence qu'est due la résistance qu'on éprouve à enlever une planche posée sur l'eau; c'est à la même force qu'est due la difficulté qu'on rencontre à marcher dans une boue grasse. Plongés dans l'eau, dans l'alcool et dans la plupart des liquides, les corps solides en sortent mouillés, c'est-à-dire recouverts d'une couche liquide : c'est l'adhérence qui la soutient.

CAPILLARITÉ, ABSORPTION.

59. **Phénomènes capillaires.** — L'attraction moléculaire, lorsqu'elle s'exerce entre un solide et un liquide, donne naissance à des phénomènes particuliers qu'on désigne sous le nom de ***phénomènes capillaires***, parce qu'ils s'observent surtout dans les ***tubes***

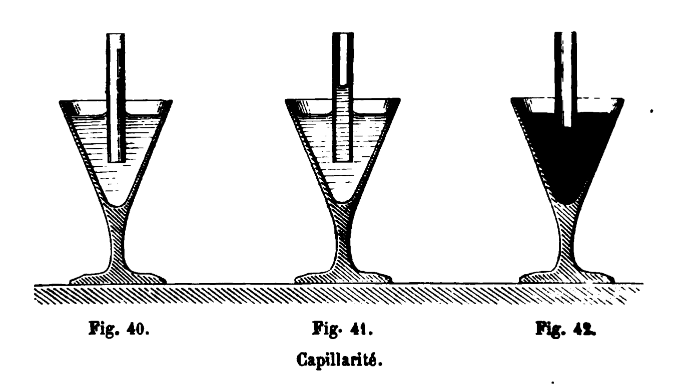


Fig. 40. Fig. 41. Fig. 42.
Capillarité.

capillaires. On nomme ainsi tous les tubes d'un diamètre intérieur très-petit, d'un mot latin qui signifie ***cheveu***, parce que les cheveux étant creux, sont comparables à de petits tubes très-étroits. La force qui produit les phénomènes capillaires se désigne elle-même sous le nom de ***capillarité***. Ses effets sont très-variés; nous citerons les suivants :

1° Lorsqu'on plonge dans l'eau, ou dans tout autre liquide, un corps de nature à être mouillé, une petite baguette de verre, par exemple, on remarque que le liquide est légèrement soulevé tout autour du corps, sa surface prenant une forme concave, comme le montre la figure 40.

2° Si au lieu d'une baguette pleine, on plonge dans l'eau un tube de verre creux (fig. 41), non-seulement le liquide est soulevé sur le contour du tube, mais il s'élève à l'intérieur à une hauteur d'autant plus grande que le tube est plus étroit, et la surface du liquide prend intérieurement une forme concave.

3° Si le tube n'est pas mouillé par le liquide, comme cela arrive

lorsque celui-ci est du mercure; alors, au lieu de s'élever dans le tube, le liquide s'abaisse, et cela d'autant plus que le tube est plus étroit (fig. 42); enfin, la surface du liquide, qui était concave dans le cas précédent, est maintenant convexe.

Tous ces phénomènes et beaucoup d'autres que nous ne mentionnons pas, ont pour cause l'attraction moléculaire qui s'exerce entre la substance des tubes et le liquide, combinée avec l'attraction des molécules liquides entre elles. C'est aux mêmes forces qu'est due la légère ascension des liquides sur le pourtour intérieur des parois des vases qui les contiennent; par exemple, dans un verre à boire, dans une carafe remplie d'eau.

60. **Effets dus à la capillarité.** — C'est par un effet de capillarité que l'huile s'élève dans les mèches des lampes, et le suif en fusion dans les mèches des chandelles. Les interstices qui existent entre les fibres du coton dont les mèches sont formées, jouent le rôle de petits tubes extrêmement capillaires, dans lesquels a lieu l'ascension. Dans les corps très-poreux, les pores, en communiquant entre eux, forment comme des séries de petits tubes capillaires qui produisent le même effet. Par exemple, si vous plongez un morceau de sucre, seulement par sa partie inférieure, dans du café, vous voyez le liquide s'élever rapidement et envahir tout le morceau. Il est même à remarquer que le sucre se dissout alors plus vite que si on l'avait plongé immédiatement dans le café. Cela provient de ce que, dans ce dernier cas, l'air qui remplit les pores, ne pouvant se dégager aussi facilement que lorsque le morceau de sucre n'est qu'en partie immergé, s'oppose à la pénétration du liquide dans la masse du sucre, et en retarde ainsi la dissolution.

61. **Absorption et imbibition.** — On entend par *absorption* la pénétration, dans un corps poreux, d'une substance étrangère, solide, liquide ou gazeuse; et par *imbibition* la pénétration d'un liquide dans un corps solide.

Le charbon a un grand pouvoir absorbant pour les gaz. En effet, si l'on fait passer un charbon incandescent sous une cloche de verre pleine de gaz acide carbonique, et reposant sur un bain de mercure, on voit le volume du gaz diminuer rapidement, et on trouve que la partie qui disparaît, en pénétrant dans le charbon, représente un volume égal à 35 fois celui de ce corps. Il est même

des gaz, en chimie, dont le volume ainsi absorbé peut égaler 90 fois celui du charbon.

Dans les végétaux et les animaux, on rencontre constamment des exemples d'absorption : les racines des plantes absorbent du sol l'eau et les autres substances nécessaires à l'accroissement des tiges, des feuilles et des fruits. Chez les animaux, l'absorption joue un rôle important dans la nutrition et dans la respiration. Il est même à observer que les tissus des animaux peuvent absorber aussi des substances solides. Par exemple, dans les arts où les ouvriers ont à manier des sels de plomb ou de mercure, ces métaux sont absorbés peu à peu dans l'économie animale, et y produisent des accidents redoutables qu'on ne peut prévenir avec trop de soin.

62 **Effets dus à l'imbibition.** — On a vu ci-dessus qu'on entend par imbibition la pénétration d'un liquide dans les pores d'un corps solide. C'est toujours là un effet de capillarité, car les pores, en communiquant entre eux, forment une série de petits tubes très-irréguliers, mais très-fins, dans lesquels les liquides tendent à pénétrer, par la même raison que l'eau monte, dans les petits tubes de verre, au-dessus de son niveau extérieur. Telle est la cause de l'imbibition de l'eau dans les éponges, dans les bois, dans la terre.

C'est par un effet d'imbibition que le tabac se dessèche promptement dans une tabatière de bois, tandis que dans une tabatière d'or ou d'argent, il se conserve frais, parce que son humidité n'est pas absorbée par le métal.

En s'imbibant dans les matières végétales et animales, l'eau en augmente le volume ; de là un grand nombre de phénomènes qui se présentent journellement à notre observation. Par exemple, si, ayant mesuré une feuille de papier un peu grande, on la mouille légèrement, on trouve en la mesurant de nouveau que ses deux dimensions sont notablement augmentées. Cette propriété est utilisée par les dessinateurs pour tendre le papier sur lequel ils veulent dessiner. Ils le mouillent, puis en collent les bords sur une planchette de bois avec de la colle à bouche. En séchant, le papier, qui s'était allongé, se resserre et se tend fortement. C'est par la même raison que les papiers de tenture de nos appartements, après avoir été collés sur toile, le long des murailles, se tendent quelquefois jusqu'à se déchirer.

Dans les arts, pour courber une pièce de bois, on chauffe la face du côté où l'on veut obtenir la courbure, et on mouille la face opposée. Celle-ci s'allongeant par l'effet de l'eau qu'elle absorbe, tandis que l'autre se raccourcit par l'effet de la sécheresse, il en résulte nécessairement une courbure du côté de la face chauffée.

On a déjà vu (11) que c'est à cause des changements de volume qu'elles subissent sous l'influence de l'humidité et de la sécheresse, que les boiseries de nos appartements font souvent entendre des craquements aux changements de temps.

Par l'absorption de l'humidité, les cordes se raccourcissent; par la sécheresse, elles s'allongent. Cela peut paraître opposé à ce que nous disions plus haut en parlant du papier mouillé, mais il est facile d'en donner l'explication. En effet, les cordes étant formées de fibres de chanvre enroulées ensemble, et ces fibres se gonflant par l'absorption de l'eau, la corde devient plus grosse, et par suite chaque fibre doit faire, pour s'enrouler, un circuit plus grand, d'où résulte un raccourcissement de la corde d'autant plus grand qu'elle s'est plus gonflée. C'est par la même raison que les toiles neuves éprouvent un retrait considérable lorsqu'on les mouille pour la première fois.

A ce sujet, on rapporte que le pape Sixte-Quint, voulant faire élever sur une place de Rome un obélisque qu'il avait fait venir d'Égypte, avait arrêté sous peine de mort, de crainte que l'opération ne fût troublée, que les spectateurs observassent le plus profond silence. Or, l'obélisque était au moment d'être dressé sur son piédestal, quand les cordes qui le soutenaient s'allongeant par la traction d'un tel fardeau, l'opération se trouva gravement compromise. Une voix, celle de l'architecte Zapaglia, s'écria alors, du milieu de la foule: « Mouillez les cordes! » On le fit, les cordes se raccourcirent et l'obélisque fut dressé.

Enfin, passant des grandes choses aux petites, disons encore que si les cors aux pieds font souffrir à l'approche des temps de pluie, c'est parce qu'ils se gonflent en absorbant l'humidité de l'air.

CHAPITRE VII

PROPRIÉTÉS PARTICULIÈRES AUX SOLIDES.

63. **Ténacité.** — Outre les propriétés générales dont il a été question jusqu'ici, propriétés qui se rencontrent également dans les solides, dans les liquides et dans les gaz, il est quelques propriétés, particulières aux solides, qui méritent d'être connues par les nombreuses applications qu'elles présentent. Ces propriétés sont la *ténacité*, la *dureté*, la *ductilité* et la *malléabilité*.

On nomme *ténacité* d'une substance la résistance qu'elle oppose à la rupture lorsqu'on la soumet à une traction plus ou moins considérable. On peut mesurer cette force en kilogrammes. Pour cela, on donne, à la substance dont on cherche la ténacité, la forme d'une tige cylindrique; puis, fixant celle-ci par son extrémité supérieure, on attache à sa partie inférieure un plateau de balance dans lequel on met successivement des poids jusqu'à ce que la tige se rompe. Le nombre de kilogrammes qui détermine la rupture représente la limite de ténacité de la tige pour une grosseur donnée.

On trouve ainsi que, de tous les métaux, c'est le fer qui a la plus grande ténacité. Une tige de fer cylindrique, d'une section d'un centimètre carré, ne se rompt que sous une charge de 6000 kilog.; une tige de bois de frêne de même dimension se rompt pour 1200 kilog., et une tige de chêne pour 700 kilog.; une corde de piano se rompt à 100 kilog. de charge.

L'expérience et la théorie ont fait voir que, pour une même substance, deux tiges, l'une pleine, l'autre creuse, mais contenant la même quantité de matière, c'est-à-dire de même poids à longueur égale, ne présentent pas la même résistance à la rupture, et que c'est la tige creuse qui possède la plus grande ténacité. Il en est de même pour la résistance que présentent les corps à l'écrasement lorsqu'on les charge; c'est-à-dire qu'à masse, à longueur et à substance égales, un cylindre creux est plus résistant qu'un cylindre plein. Cette propriété des tubes creux nous conduit à cette consé-

quence remarquable que les os des animaux, les plumes des oiseaux, les tiges des graminées et d'un grand nombre d'autres plantes, opposent à la rupture plus de résistance, que si, à masses égales, c'est-à-dire sans peser davantage, elles étaient pleines.

64. **Dureté.** — On entend par *dureté* d'une substance la résistance qu'elle présente à être rayée ou usée par une autre.

On compare la dureté de deux corps en cherchant celui qui raie l'autre. On a constaté ainsi que le plus dur de tous les corps est le diamant, car il raie tous les corps et n'est rayé par aucun. Après lui viennent le saphir, le rubis, le cristal de roche, le silex, etc.

On ne doit pas confondre la dureté d'un corps avec sa résistance au choc ou à la pression. Le verre, le diamant sont beaucoup plus durs que le bois, le fer et tous les autres métaux, et cependant ils résistent beaucoup moins au choc : ils sont plus cassants.

Quand on allie ensemble plusieurs métaux, l'alliage est, en général, plus dur que les métaux qui le composent. Par exemple, c'est pour donner plus de dureté à l'or et à l'argent, qui sont des métaux mous, que, dans la bijouterie et dans la fabrication des monnaies, on les allie au cuivre. De même, pour donner plus de consistance aux poteries d'étain, on allie ce métal à une petite quantité de plomb.

La dureté des corps est utilisée dans les poudres à polir, comme l'émeri, le tripoli, qui sont des substances minérales. Le diamant étant le plus dur de tous les corps, on ne peut l'user qu'à l'aide d'une poudre nommée *égrisée*, laquelle n'est autre chose que du diamant pulvérisé.

65. **Ductilité.** — La *ductilité* est la propriété que possèdent certains corps de s'étirer en fils, ou de s'étendre en feuilles, par l'effet de tractions ou de pressions plus ou moins considérables.

Il est des corps, comme la cire, l'argile, le mastic de vitrier, dont la ductilité est telle qu'ils peuvent être étirés, aplatis, modelés entre les doigts avec la plus grande facilité. Pour d'autres, comme le verre, les résines, cette propriété ne se manifeste que lorsque ces corps sont portés à une certaine température. Le verre est même alors tellement ductile qu'il peut s'étirer en fils d'une finesse extrême et assez flexibles pour qu'on ait pu en fabriquer des étoffes. Un grand nombre de métaux, comme l'or, l'argent, le

cuivre, sont ductiles, même à la température ordinaire, mais il faut alors des efforts puissants, tels que ceux qu'on obtient à l'aide de la filière ou du laminoir.

66. **Malléabilité.** — La *malléabilité* est la propriété qu'ont les métaux ductiles de s'étendre sous le marteau. Cette propriété augmente beaucoup avec la température; tout le monde sait que le fer, par exemple, se forge bien plus facilement à chaud qu'à froid.

L'or est très-malléable, même à la température ordinaire. Pour le réduire en feuilles très-minces, les batteurs d'or en fabriquent d'abord, à l'aide du laminoir, de longues lames de deux à trois centimètres de large et d'un millimètre d'épaisseur environ. On coupe ensuite ces lames en petits carrés qu'on étend sous le marteau, puis on les coupe et on les bat de nouveau, et ainsi de suite. Mais si on frappait directement dessus, on ne pourrait continuer longtemps l'opération, parce que le métal se déchirerait; on est obligé de placer les lames que l'on bat entre des feuilles d'une substance qui, sous une faible épaisseur, possède une grande résistance. Ce sont d'abord des feuilles de vélin et de parchemin bien dégraissées, et enfin des feuilles de baudruche. On arrive ainsi à des feuilles d'or tellement minces qu'il en faut 800 superposées pour former une épaisseur d'un millimètre. L'argent et le cuivre se travaillent de la même manière. Ce sont des feuilles ainsi préparées qu'on emploie dans les arts pour la dorure sur métal, sur bois, sur papier, sur toile peinte, etc.

La ductilité des métaux varie suivant qu'on les travaille à la filière, au laminoir ou au marteau. En groupant les métaux usuels par ordre de ductilité décroissante, on trouve : à la filière, le platine, l'argent, le fer, le cuivre, l'or, le zinc, l'étain et le plomb; au laminoir, l'or, l'argent, le cuivre, l'étain, le plomb, le zinc, le platine et le fer; au marteau, le plomb, l'étain, l'or, le zinc, l'argent, le cuivre, le platine et le fer. Tous ces métaux doivent être purs; s'ils sont alliés à un métal ou à une autre substance, ils sont cassants et fort peu ductiles.

LIVRE II

HYDROSTATIQUE

CHAPITRE PREMIER

PRESSIONS TRANSMISES ET EXERCÉES PAR LES LIQUIDES.

67. **Objet de l'hydrostatique.** — On donne le nom d'*hydrostatique*, de deux mots grecs qui signifient *équilibre de l'eau*, à la partie de la physique qui traite des conditions d'équilibre des liquides, et des pressions exercées par ces corps. Nous allons étudier séparément ces deux parties de l'hydrostatique, en ayant soin de faire connaître d'abord les propriétés caractéristiques des liquides.

68. **Caractères particuliers des liquides.** — Un des caractères essentiels de tout liquide est d'abord l'extrême mobilité de ses molécules, laquelle montre combien est faible la force de cohésion qui les unit, puisque cédant au plus léger effort qui tend à les mouvoir, elles glissent aussitôt les unes sur les autres. C'est à cette grande mobilité des molécules des liquides qu'est due leur fluidité.

Un autre caractère essentiel des liquides, est une incompressibilité presque complète. En effet, on a déjà vu (10) que la compressibilité de ces corps est tellement faible qu'on les a regardés longtemps comme complétement privés de cette propriété. Ce n'est qu'en 1823, qu'Œrsted, physicien suédois, a démontré rigoureusement, à l'aide d'un appareil qu'il a nommé *piézomètre* (mesureur de pression), que les liquides sont compressibles. Au moyen du même appareil, on a trouvé, depuis, que sous une pression égale à celle de l'atmosphère, l'eau distillée se comprime d'un quarante-neuf millionièmes de son volume, ce qui représente près d'un vingtième de litre pour un mètre cube d'eau. Le mercure, à pression égale, se comprime dix fois moins.

A ces propriétés caractéristiques des liquides, ajoutons qu'ils sont poreux, élastiques, impénétrables, comme tous les autres corps. Les preuves de leur porosité ont déjà été données (10) ; leur élasticité est une conséquence de leur compressibilité ; quant à leur impénétrabilité, elle se manifeste toutes les fois qu'on y plonge un corps solide. En effet, un vase étant plein d'un liquide quelconque, si l'on y plonge une substance solide, dans laquelle le liquide ne puisse s'imbiber, on observe qu'il s'écoule par dessus les bords du vase un volume de liquide exactement égal au volume du corps immergé.

L'extrême mobilité des molécules des liquides et leur impénétrabilité nous conduisent à la propriété que possèdent ces corps de transmettre en tous sens les pressions qu'ils supportent.

69. **Transmission des pressions en tous sens par les liquides, principe de Pascal.** — Concevons un vase cylindrique, un verre à boire, par exemple, et, dans ce vase, un bloc de bois de même forme, qui, n'en touchant qu'à peine les parois latérales, repose tout entier sur le fond. Cela posé, si l'on vient à exercer une pression quelconque sur ce bloc, il arrivera qu'en vertu de la force de cohésion qui unit ses molécules et s'oppose à sa déformation, cette pression ne se transmettra que sur le fond du verre et nullement sur ses parois latérales. Or, il n'en est plus ainsi lorsqu'on comprime un liquide.

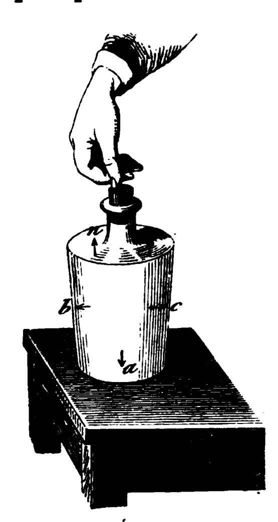


Fig. 43. – Égalité de pression en tous sens.

Soit, en effet, un flacon complétement rempli d'eau et fermé par un bouchon ; si l'on presse sur ce bouchon, comme le montre la figure 43, cette pression se transmettant aux molécules en contact avec lui, ces molécules, à leur tour, compriment celles qui sont au-dessous, et s'efforçant de pénétrer entre elles, non-seulement elles les pressent de haut en bas, mais latéralement. Or, les molécules ainsi

refoulées de côté, réagissant à leur tour sur les molécules voisines pour se loger entre elles, donnent naissance à des pressions de bas en haut en même temps qu'à des pressions de haut en bas. Par suite, il se transmet de molécule à molécule, du bouchon jusqu'aux parois du vase, des pressions égales à celles qu'on exerce sur le bouchon, et cela sur le fond du vase, sur ses parois latérales *b* et *c*, et même sur la partie supérieure *mn*.

De là découle le principe suivant, connu sous le nom de ***principe d'égalité de pression*** ou ***principe de Pascal***, parce que c'est Blaise Pascal, célèbre écrivain et physicien, mort en 1662, qui, le premier, l'a fait connaître, savoir : ***les liquides transmettent en tous sens, avec la même intensité, toute pression exercée en un point quelconque de leur masse.***

Quand nous disons que la pression transmise par les liquides l'est en tous sens avec la ***même intensité***, il faut bien entendre que c'est à ***surface égale***, c'est-à-dire pour une portion de paroi de même étendue que la surface liquide comprimée. Par exemple, si, dans la figure 43, l'extrémité inférieure du bouchon a un centimètre carré de surface, et si la force qui tend à l'enfoncer est de deux kilogrammes, chaque centimètre carré de la paroi du vase supporte, de dedans en dehors, une pression de deux kilogrammes; mais une portion de paroi de deux centimètres carrés de surface supporte une pression de quatre kilogrammes; si la surface est de trois centimètres carrés, la pression transmise est de six kilogrammes, et ainsi de suite. En sorte qu'on peut accroître la pression ainsi transmise autant qu'on le veut, en augmentant la surface qui la reçoit.

Le principe de Pascal sert de base à toute l'hydrostatique, et on en verra bientôt une application importante dans l'appareil connu sous le nom de ***presse hydraulique*** (75).

70. Pressions que fait naître la pesanteur dans les liquides. — Dans ce qui précède, nous avons considéré les pressions transmises sur les parois des vases lorsque l'on comprime la surface des liquides qui y sont renfermés. Or, il n'est pas nécessaire de comprimer ainsi la surface d'un liquide pour faire naître des pressions intérieures dans sa masse et sur les parois du vase qui le contient. Le poids seul du liquide suffit pour produire des pressions dont l'in-

tensité varie, comme on va le voir, avec la profondeur et la densité du liquide.

En effet, un vase quelconque étant rempli d'eau, si l'on conçoit ce liquide partagé en tranches horizontales d'égale épaisseur, il est évident que la seconde tranche supporte une pression égale au poids de la première ; que la troisième supporte une pression égale au poids des deux premières, et ainsi de suite ; en sorte que la pression va croissant comme le nombre des tranches, ce qu'on exprime en disant que ***la pesanteur fait naître dans les liquides des pressions proportionnelles à la profondeur.***

Il est évident que ces pressions sont en outre ***proportionnelles à la densité des liquides***, c'est-à-dire qu'à profondeur égale, dans un liquide deux ou trois fois plus dense, la pression est elle-même deux ou trois fois plus grande.

Enfin, en vertu du principe d'égalité de pression en tous sens (69), les pressions que la pesanteur fait naître dans les liquides ne s'exercent pas seulement dans la direction de cette force, mais ***horizontalement*** et même ***de bas en haut,*** comme cela va être démontré dans les paragraphes suivants.

71. **Pressions latérales, tourniquet hydraulique.** — L'existence des pressions latérales qu'exercent les liquides sur les parois des vases qui les contiennent, se démontre au moyen d'un appareil connu sous le nom de ***tourniquet hydraulique***. Représenté dans la figure 44, cet appareil se compose d'un long tube C, maintenu par un support *n*, dans lequel il peut tourner librement. A son extrémité supérieure, ce tube est soudé à un vase D, dans lequel s'écoule l'eau d'un réservoir. Enfin, à sa partie inférieure, il est mastiqué dans une pièce de cuivre creuse, reposant sur un pivot, et à laquelle sont adaptés, en croix, quatre tubes creux, disposés horizontalement et recourbés tous dans le même sens à leur extrémité.

Cela posé, l'eau du vase D, descendant le long du tube, s'écoule par les orifices des tubes recourbés, et aussitôt on les voit prendre, dans le sens indiqué par la flèche, un mouvement de rotation rapide, qui se communique au tube C et au vase D. Or, c'est par l'effet des pressions latérales exercées par la colonne d'eau qui est dans le grand tube, qu'a lieu ce mouvement de rotation. Pour nous en rendre compte, considérons un des tubes recourbés *a*AB*b*, tel

qu'il est représenté sur la droite du dessin, et supposons d'abord les orifices *a* et *b* fermés. La colonne d'eau qui remplit le tube C exerce alors, sur les portions de parois opposées A et *a*, des pressions égales et contraires qui se font équilibre ; il en est de même en B et en *b*, et dès lors il ne peut se produire de rotation dans un sens ni dans l'autre. Au contraire, si les orifices *a* et *b* sont ouverts, comme cela a effectivement lieu dans l'appareil, l'eau s'écoulant par ces orifices, les pressions en *a* et en *b* n'existent plus, tandis que celles transmises en A et en B continuant d'agir, ce sont elles qui font tourner les tubes dans le sens indiqué par la flèche.

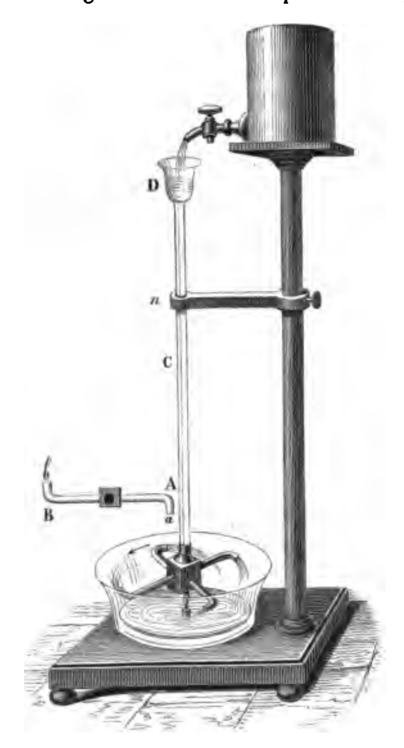


Fig. 44. — Tourniquet hydraulique.

C'est en vertu des pressions que les liquides exercent latéralement que les digues qui retiennent les eaux d'un étang, d'un lac ou d'une rivière, se crèvent quelquefois en cédant à l'effort qu'elles supportent.

72. Poussée de bas en haut exercée par les liquides. — Il nous reste à faire voir que les pressions que la pesanteur fait naître dans la masse des liquides ne se transmettent pas seulement dans le sens horizontal, comme on vient de le vérifier à l'aide du tourniquet hydraulique, mais aussi de bas en haut. Pour démontrer cette propriété remarquable des liquides, qui est encore une conséquence du principe de Pascal (69), l'expérience est disposée comme le représente la figure 45.

On prend un tube de verre un peu gros, ouvert à ses deux bouts, et on applique contre son bord inférieur un disque de verre *a*, qui le ferme hermétiquement. Soutenant d'abord ce disque au moyen d'un fil *b* fixé à son centre, on plonge le tout dans l'eau, comme le montre le dessin, puis on lâche le fil. Or, on observe alors que le disque *a*, quoique plus dense que l'eau, ne tombe pas, ce qui prouve qu'il supporte de bas en haut une pression qui le soutient. Il ne tombe pas davantage quand on verse peu à peu de l'eau dans le tube, tout le temps du moins que la hauteur du liquide au-dessus du disque *a* est moindre à l'intérieur qu'à l'extérieur; mais à l'instant où la hauteur est la même des deux côtés, on voit le disque se précipiter au fond du vase. Puisqu'il ne tombe qu'alors, cela montre que ***la poussée que supporte le disque, de bas en haut, est précisément égale au poids de la colonne d'eau qui a pour base ce disque, et pour hauteur la distance de celui-ci au niveau de l'eau dans le vase où plonge le tube.***

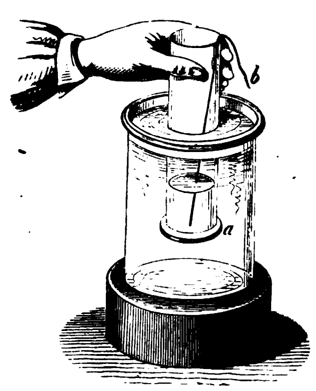


Fig. 45. — Poussée de bas en haut.

La poussée de bas en haut que supportent ainsi les corps immergés est sensible lorsqu'on plonge un bras dans l'eau; elle l'est bien davantage si on le plonge dans le mercure, qui, étant plus dense, donne lieu à des pressions bien plus considérables. C'est par l'effet de la poussée des liquides, que lorsqu'un bateau est troué vers le fond, on voit l'eau s'y précipiter avec force. Enfin, nous verrons bientôt que c'est cette poussée qui soutient tous les corps qui flottent à la surface de l'eau, ou restent en suspension dans sa masse.

73. **Les pressions exercées par les liquides sont indépendantes de la forme des vases.** — Les différentes pressions auxquelles la pesanteur donne naissance dans les liquides, soit qu'elles s'exercent de haut en bas, de bas en haut, ou latéralement sur les parois des vases, croissent, comme on l'a vu (70), proportionnellement à la

hauteur des liquides et à leur densité, mais présentent en outre cette propriété remarquable d'*être indépendantes de la forme des vases et de la quantité de liquide qu'ils contiennent*, et, par suite, de ne dépendre, pour un même liquide, *que de la profondeur*.

Pour démontrer ce principe par l'expérience, on a imaginé plusieurs appareils, parmi lesquels nous choisissons celui représenté dans la figure 46. Sur un vase cylindrique P est un couvercle métallique, qui porte, à son centre, une tubulure sur laquelle peuvent se visser, à volonté, trois tubes A, B, C, de formes et de capacités différentes, mais tous d'égale grosseur à leur base. La tubu-

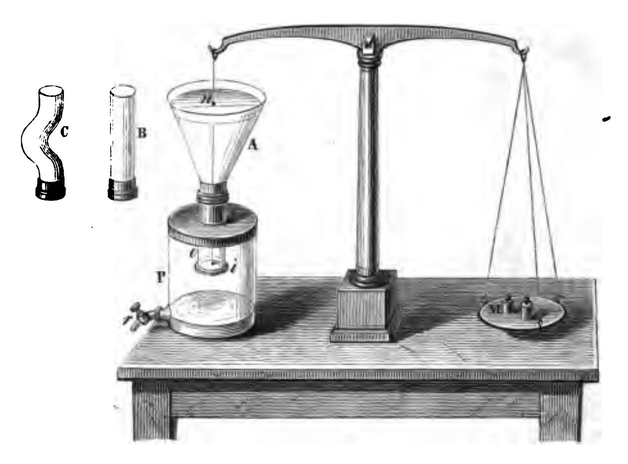


Fig. 46. — Pression indépendante de la forme des vases.

lure fixée au couvercle est prolongée en dessous par un tube de verre *o*, de même diamètre, qui est fermé par un disque *i*. Celui-ci n'est point mastiqué au tube de verre, mais s'applique simplement sur ses bords, étant maintenu par un fil attaché, d'un bout, à son centre, et, de l'autre, à l'une des extrémités du fléau d'une balance. A l'autre extrémité de ce fléau est suspendu un bassin destiné à recevoir des poids.

Cela posé, ayant chargé le plateau M d'un poids convenable, et le vase conique A étant vissé sur le couvercle du vase P, on verse

de l'eau dans ce vase jusqu'à ce que le disque *i* se détache par l'effet de la pression; supposons qu'il ait fallu pour cela verser de l'eau jusqu'à ce que son niveau atteigne le point *n*. Laissant alors écouler l'eau du vase A, on le dévisse et l'on met à sa place successivement les tubes B et C. Puis, recommençant à chaque fois l'expérience, avec le même poids dans le plateau M, on verse encore de l'eau dans ces tubes jusqu'à ce que le disque *i* se détache de nouveau; or, on observe que cela arrive toujours précisément lorsque le liquide atteint la même hauteur que dans la première expérience, c'est-à-dire lorsqu'il arrive au point *n*. On voit donc qu'*à hauteur égale*, la pression est la même dans les trois cas, ce qui démontre le principe énoncé.

Ce principe se désigne quelquefois sous le nom de ***paradoxe hydrostatique***, pour exprimer ce qu'il paraît avoir de paradoxal, en ce sens que même avec des quantités très-minimes de liquide, on peut obtenir des pressions considérables, ainsi que le prouve l'expérience suivante.

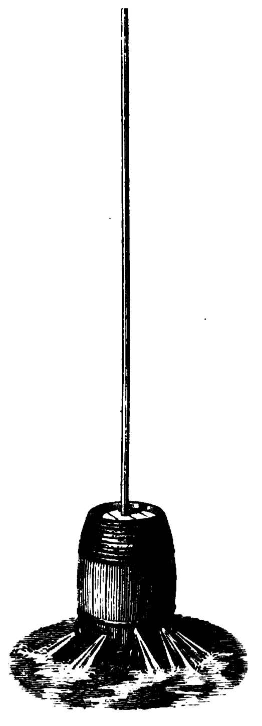


Fig. 47. — Tonneau de Pascal.

74. Expérience du tonneau de Pascal. — Pour vérifier combien sont puissantes les pressions exercées par les liquides, même sous un très-petit volume, lorsqu'ils sont contenus dans des vases d'une grande hauteur, Pascal fit à Rouen, en 1647, l'expérience suivante. Il fixa sur un tonneau de bois, très-solidement construit, un tube d'un très-petit diamètre, mais de dix mètres de hauteur; puis remplit d'eau le tonneau et le tube. Or, aussitôt le tonneau éclata (fig. 47) par l'effet des pressions qui se transmettaient sur les douves de dedans en dehors, pressions qui étaient les mêmes que si le tube avait eu

partout le diamètre du tonneau, ou même un diamètre beaucoup plus grand (73).

75. **Presse hydraulique.** — Nous terminerons ce qui a rapport aux pressions des liquides par l'application qui a été faite du principe d'égalité de pression en tous sens (69) à la *presse hydrau-*



Fig. 48. — Presse hydraulique.

lique, appareil avec lequel un seul homme peut exercer des pressions considérables. Représentée en élévation dans la figure 48 et en coupe dans la figure 49, la presse hydraulique se compose de deux corps de pompe en fonte A et B, d'inégal diamètre. Dans le corps de pompe A, qui est intérieurement d'un très-petit diamètre, s'engage une tige cylindrique a, formant piston, et pouvant s'élever et s'abaisser à l'aide d'un levier O. Dans le cylindre B, dont le diamètre

intérieur égale douze ou quinze fois celui du corps de pompe A, est un long cylindre de fonte C, qui forme aussi piston et peut glisser dans le cylindre B, tout en le fermant hermétiquement. A la partie supérieure du cylindre C est fixé un plateau de fonte K, montant et descendant avec lui. Enfin, quatre colonnes de fonte portent un deuxième plateau MN, qui est fixe; c'est entre les deux plateaux K et MN que sont placés les objets qu'on veut comprimer.

Cela posé, aussitôt qu'à l'aide du levier O, on soulève le piston *a*, le vide se faisant dans le corps de pompe A, une soupape S, qui est à sa partie inférieure, s'ouvre et laisse passer dans le corps de pompe de l'eau contenue dans un réservoir P. Quand le piston *a* redescend, la soupape S se ferme, mais une soupape *m*, placée à

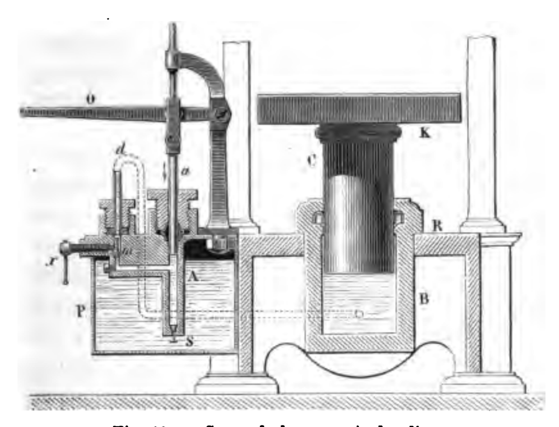


Fig. 49. — Coupe de la presse hydraulique.

la base du tube *d*, s'ouvre; par suite, l'eau refoulée s'échappe par ce tube qui la conduit dans le corps de pompe B. A un second coup du piston *a*, une nouvelle quantité d'eau est aspirée du réservoir P et refoulée dans le corps de pompe B, et ainsi de suite.

Or, en vertu du principe de Pascal, la pression exercée de haut en bas par le petit piston *a* se transmet de bas en haut sur le piston C, et l'effet en est amplifié autant de fois que la surface du grand piston contient celle du petit. Par exemple, si la surface du piston C égale 150 fois celle du piston *a*, et que la pression qu'on

exerce sur celui-ci, à l'aide du levier O, soit de 80 kilogrammes, la pression qui tendra à soulever le piston C sera 150 fois 80, ou 12000 kilogrammes. Avec les grandes presses hydrauliques employées dans l'industrie, on exerce jusqu'à des pressions de 50000 kilogrammes. Ces énormes pressions sont transmises du piston C au plateau K, qui, en s'élevant, comprime les corps qui reposent sur lui.

La presse hydraulique est utilisée pour presser les substances dont on veut extraire le suc, par exemple, les graines oléagineuses dont on retire l'huile, les betteraves qui servent à la fabrication du sucre, les pommes dont on fait le cidre, etc. ; elle sert encore à comprimer les corps dont on veut réduire le volume, comme le foin, la laine, le coton, qu'on transporte à bord des navires. Enfin, la presse hydraulique peut être employée à soulever de lourds fardeaux. Par exemple, lorsqu'on a réparé la cathédrale de Strasbourg, la flèche a été soutenue, isolée dans l'air, sans autre support que quatre presses hydrauliques.

CHAPITRE II

ÉQUILIBRE DES LIQUIDES.

76. **Conditions d'équilibre des liquides.** — On a vu que pour qu'un corps solide demeure en équilibre, il suffit que son centre de gravité soit soutenu par un point fixe (42), toutes les autres parties du corps conservant alors le même état d'équilibre par l'effet de la cohésion qui les unit entre elles et au centre de gravité. Or, il n'en est plus ainsi dans les liquides ; par suite de la grande mobilité de leurs molécules et de la facilité avec laquelle elles obéissent sans cesse à l'action de la pesanteur, ces corps tendent constamment à s'écouler et à s'étaler horizontalement, aussitôt qu'ils ne sont plus retenus par un obstacle. C'est pourquoi tout liquide ne peut demeurer en équilibre qu'autant qu'il satisfait aux trois conditions suivantes :

1° *Le liquide doit être contenu dans un vase ou dans un bas-*

sin dont les parois s'opposent à son écoulement, en résistant aux pressions qu'il leur transmet.

2° ***Chaque molécule doit supporter en tous sens des pressions égales et contraires.***

3° ***La surface du liquide doit être horizontale, c'est-à-dire perpendiculaire en tous ses points à la direction de la pesanteur.***

Les deux premières conditions peuvent être regardées comme évidentes. Pour nous rendre compte de la troisième, observons que dans un liquide dont la surface est horizontale, toutes les molécules se soutenant les unes les autres, l'action de la pesanteur se trouve détruite, et que, par suite, il y a nécessairement équilibre. Au contraire, si la surface n'est pas horizontale, si certaines parties s'élèvent plus que d'autres, les molécules les plus hautes n'étant plus soutenues, rien ne s'oppose à ce qu'elles obéissent à l'action de la pesanteur pour descendre, et dès lors l'équilibre est impossible.

Quand nous disons que pour qu'un liquide demeure en équilibre, sa surface doit être horizontale, il importe d'observer que ce principe suppose que le liquide n'est sollicité que par la pesanteur, ce qui est le cas ordinaire. S'il est soumis à l'action d'autres forces, comme il arrive dans les phénomènes capillaires (59), où il est attiré par les parois des vases, la surface est alors inclinée de manière à être perpendiculaire à la résultante des forces qui sollicitent le liquide (fig. 41 et 42).

77. **Niveau des liquides.** — On dit qu'un liquide est de ***niveau*** lorsque tous les points de sa surface sont dans un même plan horizontal. Toutefois, ceci ne doit s'entendre que pour des surfaces de peu d'étendue. En effet, la direction de la verticale changeant constamment d'un lieu à un autre (38), à la surface du globe, il en est nécessairement de même pour toute surface horizontale; c'est-à-dire qu'un plan horizontal en un point de la surface terrestre n'est point parallèle à un second plan horizontal en un point voisin : ces deux plans sont inclinés l'un par rapport à l'autre. Par suite, on conçoit qu'une surface liquide d'une certaine étendue, à l'état d'équilibre, devant être horizontale en chacune de ses parties, ne peut présenter une seule et même surface plane, mais une

suite de surfaces planes inclinées entre elles, d'où résulte forcément une surface courbe. Toutefois, cette courbure n'est pas appréciable pour des surfaces liquides d'une petite étendue, comme celle de l'eau contenue dans un vase; car, dans ce cas, la surface du liquide est encore si parfaitement nivelée qu'elle réfléchit les rayons lumineux comme le miroir plan le mieux travaillé. Pour les grandes étendues d'eau, comme les mers, la courbure est facile à constater. En effet, si la surface des mers était plane, un navire qui s'éloigne du rivage ne cesserait d'être visible que par l'effet de l'éloignement, et ce seraient les parties les moins apparentes, les mâts et



Fig. 50. — Rondeur des mers.

es cordages, qui disparaîtraient les premières. Or, ce n'est pas ce qu'on observe, car c'est la coque du navire qui disparaît d'abord au-dessous de l'horizon, puis la partie inferieure des mâts, et enfin leur sommet, comme le fait voir la figure 50, ce qui démontre la courbure de la surface des mers.

78. **Niveau vrai et niveau apparent.** — Lorsque l'on considère une grande étendue d'eau, comme la mer Méditerranée, par exemple, on dit que sa surface est de niveau quand tous les points de cette surface sont également distants du centre de la terre. Le niveau

ainsi considéré est le ***niveau vrai;*** tandis que celui qui consiste en ce que tous les points de la surface du liquide soient dans un même plan horizontal, est le ***niveau apparent***, le niveau pour l'œil. Ce n'est que pour de petites surfaces liquides que le niveau vrai se confond avec le niveau apparent. Si la terre ne tournait pas sur elle-même, la surface de toutes les mers prendrait le niveau vrai; mais par l'effet de la force centrifuge qui résulte de son mouvement diurne (30), la surface est renflée vers l'équateur, et le niveau y est plus haut qu'aux pôles.

79. **Équilibre des liquides dans les vases communiquants.** —



Fig. 51. — Vases communiquants (cas d'un seul liquide).

La tendance des liquides à se mettre de niveau ne se manifeste pas seulement lorsqu'ils sont contenus dans un seul vase, mais encore quand ils sont dans des vases communiquant entre eux. En effet, quelles que soient alors la forme et les dimensions de ces vases, ***un même liquide ne peut s'y maintenir en équilibre qu'autant que son niveau est le même dans tous les vases.***

Pour démontrer ce principe par l'expérience, on fait usage de l'appareil représenté dans la figure 51. C'est un système de vases de formes et de capacités très-différentes, qui communiquent tous

entre eux par une tubulure horizontale. Or, lorsqu'on y verse de l'eau ou tout autre liquide, on voit le niveau s'élever en même temps et s'arrêter exactement à la même hauteur dans tous les vases. A partir de ce moment l'équilibre est établi. En effet, comme on a vu que les pressions exercées par un liquide ne dépendent pas de sa quantité, mais de sa hauteur (73), dès que celle-ci est la même dans tous les vases, au-dessus du tube de communication *abc*, la pression est nécessairement égale partout, et, par suite, le liquide n'ayant pas plus de tendance à s'écouler de *b* vers *a* que de *a* vers *b*, l'équilibre persiste.

80. **Cas où les vases communiquants contiennent des liquides différents.** — Dans ce qui précède, tous les vases communiquants

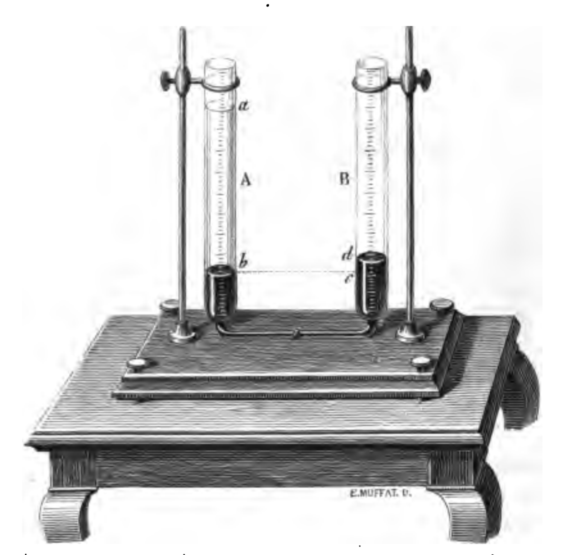


Fig. 52. — Vases communiquants (cas de deux liquides).

contenaient le même liquide. Or, il peut arriver que ces vases contiennent des liquides différents, des liquides inégalement denses. Dans ce cas, le niveau n'est plus le même; les liquides les moins denses s'élèvent davantage, et nous allons constater que la condi-

tion nécessaire pour que l'équilibre s'établisse, est ***que les hauteurs des colonnes liquides qui se font équilibre soient en raison inverse des densités des liquides;*** c'est-à-dire qu'un des liquides étant deux ou trois fois plus dense que l'autre, sa hauteur doit être deux ou trois fois moindre.

Ce principe se démontre expérimentalement au moyen de l'appareil représenté dans la figure 52. Il se compose de deux tubes de verre A et B, communiquant entre eux, à leur partie inférieure, par un tube d'un petit diamètre. Ces tubes sont soutenus par deux colonnes, et sur chacun d'eux est une échelle en millimètres, graduée sur le verre même. Cela posé, versant d'abord du mercure dans l'un des tubes, il passe en partie dans l'autre et s'élève à la même hauteur des deux côtés (79). Si actuellement on verse de l'eau dans l'un des tubes, dans le tube A, par exemple, on voit le niveau du mercure s'abaisser dans ce tube par l'effet de la pression de l'eau, et monter dans l'autre; en sorte que quand l'équilibre est établi, le mercure est plus haut dans le tube B que dans le tube A d'une quantité *cd*. Il est évident qu'alors la pression exercée par la colonne de mercure *cd* fait équilibre à la pression de la colonne d'eau *ab*. Or, si l'on mesure les hauteurs *ab* et *cd*, au moyen des échelles graduées placées sur les deux tubes, on trouve que la hauteur *cd* est 13,6 fois plus petite que *ab;* ce qui démontre le principe énoncé ci-dessus, car on verra bientôt que le mercure est 13,6 fois plus dense que l'eau.



Fig. 53. — Fiole des 4 éléments.

81. **Équilibre de différents liquides superposés.** — Pour compléter l'étude des conditions d'équilibre des liquides, il nous reste à considérer le cas où un même vase contient des liquides de densités différentes, par exemple de l'eau et de l'huile. Dans ce cas, pour qu'il y ait équilibre, il ne suffit pas que la surface de chacun

des liquides soit horizontale, ***il faut en outre que les liquides soient superposés dans l'ordre de leurs densités croissantes de haut en bas;*** c'est-à-dire le plus dense à la partie inférieure des vases, et les moins denses successivement au-dessus. Pour démontrer cette propriété par l'expérience, on a une fiole allongée (fig. 53), qu'on a nommée anciennement ***fiole des quatre éléments***, dénomination qui lui est restée. Dans cette fiole sont de l'eau, de l'alcool, une huile essentielle moins dense que l'alcool, et du mercure. En agitant la fiole, ces quatre liquides paraissent se mélanger; mais aussitôt qu'on la maintient verticale et au repos, le mercure se dépose au fond de la fiole, l'eau au-dessus, puis l'alcool, qui est moins dense que l'eau, et enfin l'huile essentielle, qui est le liquide le moins dense des quatre.

C'est par suite de la même propriété qu'on observe que l'eau douce, qui est moins dense que l'eau salée, surnage assez longtemps, à l'embouchure des fleuves, au-dessus des eaux de la mer. C'est par la même cause que la crème, qui est moins dense que le lait, s'en sépare peu à peu et monte à sa surface.

APPLICATIONS DE L'ÉQUILIBRE DES LIQUIDES.

82. **Niveau d'eau.** — Dans un grand nombre de travaux, par exemple, dans la construction des canaux de desséchement, des chemins de fer, dans le pavage des rues, il est nécessaire de déterminer la différence de niveau entre deux lieux plus ou moins éloignés. L'appareil le plus simple employé à cet usage est le ***niveau d'eau***. Il consiste en un long tube de fer blanc ou de laiton, dont les extrémités sont coudées et munies de deux tubulures de verre. Pour se servir de cet instrument on le dispose horizontalement sur un pied à trois branches, comme le montre la figure 54; puis on y verse de l'eau jusqu'à ce que le liquide s'élève dans les deux tubes de verre. Or, d'après la condition d'équilibre dans les vases communiquants (79), l'eau prend le même niveau dans les deux tubes, c'est-à-dire que les deux surfaces liquides y sont exactement dans un même plan horizontal. Si donc l'observateur qui est auprès de l'appareil, dirige un rayon visuel suivant ces deux surfaces, ce

rayon donnera la direction du niveau apparent, dans le lieu de l'observation.

Cela posé, pour prendre des nivellements, c'est-à-dire pour déterminer de combien un lieu est plus élevé qu'un autre, on se place dans l'un avec le niveau, comme le montre le dessin, tandis que dans l'autre un aide tient une *mire;* on nomme ainsi une tige de bois formée de deux pièces : l'une, qui est à coulisse, s'appuie par un pied sur le sol; l'autre, qui est mobile et glisse dans la coulisse, est terminée, à son extrémité supérieure, par une plaque carrée de fer-blanc, qui est *le voyant*. Cette plaque est divisée en



Fig. 54. — Niveau d'eau.

quatre parties égales par deux traits, l'un horizontal, l'autre vertical, se coupant au centre de la plaque; c'est ce point que regarde l'observateur placé près du niveau. Suivant que le voyant est trop haut ou trop bas, il fait signe à son aide de l'abaisser ou de l'élever, jusqu'à ce que son centre se trouve en ligne droite avec la surface de l'eau dans les tubes. L'aide lit alors sur la tige, qui est divisée en centimètres, quelle est la hauteur du voyant au-dessus du sol; si cette hauteur dépasse celle du niveau, on trouve de combien le lieu où est la mire est plus bas que celui où est le niveau, en retranchant de la hauteur de la mire celle du niveau. Si c'est, au contraire, le lieu où est la mire qui est le plus élevé, c'est la hauteur du voyant qu'on retranche de celle du niveau.

83. **Niveau à bulle d'air.** — On se sert encore, pour prendre les nivellements, d'un petit instrument qui présente plus de précision que le précédent : c'est le ***niveau à bulle d'air.*** Il se compose d'un tube de verre fermé à ses deux bouts et très-légèrement bombé en son milieu. Ce tube est rempli d'eau, mais on a soin d'y conserver une petite bulle d'air qui, en vertu de sa légèreté, vient toujours, lorsque le tube est horizontal, se loger dans la partie bombée, comme étant la plus haute. Le tube est renfermé dans un étui de cuivre, qui ne laisse à découvert que la partie bombée du tube (fig. 55). Enfin, cet étui est fixé sur une petite plaque de



Fig. 55. — Niveau à bulle d'air.

cuivre, de même longueur que lui, laquelle est dressée de manière que lorsque l'instrument repose sur un plan parfaitement horizontal, la bulle d'air s'arrête exactement dans la partie médiane du tube, entre deux arcs de cercle fixés à l'étui, comme le montre la figure. Mais si le plan sur lequel repose l'instrument est tant soit peu incliné, la bulle d'air se rapproche de la partie la plus haute. On a donc là un moyen facile de reconnaître si un corps quelconque, un meuble, un rayon de bibliothèque, une étagère, est ou n'est pas horizontal. Il suffit, pour cela, de poser le niveau sur l'objet dont on veut vérifier la position ; mais pour prendre des nivellements sur le terrain, on adapte à l'instrument une lunette, qui sert à viser une mire semblable à celle qui a été décrite en parlant du niveau d'eau (82).

84. **Jets d'eau.** — Les jets d'eau qui ornent nos jardins publics et nos promenades, sont une application de la tendance des liquides à se mettre toujours de niveau. En effet, l'eau qu'on voit ainsi

s'élever en jet, vient toujours d'un lieu plus élevé que celui où est le jet, et c'est parce qu'elle tend à se mettre de niveau dans les deux lieux, qu'elle est jaillissante. La figure 56 donne une idée de ce phénomène. Sur le coteau qui est représenté à la gauche du dessin est un réservoir rempli d'eau; de la partie inférieure de ce



Fig. 56. — Jet d'eau.

réservoir part un tube qui se rend au centre d'un bassin circulaire. Là l'eau jaillit, refoulée par la pression d'une colonne d'eau d'une hauteur égale à la différence de niveau entre le réservoir et le bassin.

La théorie démontre qu'un jet d'eau tend toujours à s'élever à une hauteur égale à celle du niveau de l'eau dans le réservoir d'où elle s'écoule; mais il n'en est jamais ainsi, parce que le jet rencontre trois sortes de résistances : 1° le frottement de l'eau dans le tube qui la conduit; 2° la résistance de l'air; 3° le choc que les molécules liquides qui retombent du sommet du jet exercent sur celles qui s'élèvent.

85. **Cours d'eau, sources, puits.** — C'est encore la tendance des liquides à prendre le niveau vrai qui produit les cours d'eau à la

surface du sol et dans le sein de la terre. En effet, dès que les eaux ne sont pas de niveau, la pesanteur, qui les sollicite toujours à descendre, les entraîne aussitôt des lieux les plus hauts vers les lieux les plus bas. C'est ainsi que les eaux versées sur la terre par les pluies et par la fonte des neiges, se rendent dans les vallées, où elles donnent naissance à des ruisseaux, à des rivières, à des fleuves, qui coulent dans leur lit, comme sur un plan incliné, jusqu'à ce qu'ils viennent se verser dans les mers. Il suffit d'une très-faible inclinaison pour rendre l'eau courante. La Seine, à Paris, pendant ses moyennes eaux, n'est qu'à 32 mètres au-dessus de l'Océan. Le développement de son cours entre ces deux points est d'environ 360 kilomètres, ce qui ne donne pas tout à fait une pente d'un dixième de millimètre par mètre; aussi les eaux de ce fleuve mettent-elles près de sept jours à parcourir cette distance.

Toute l'eau qui tombe du ciel ne s'écoule pas à la surface de la terre; une partie pénètre dans le sol et y donne naissance à de petits cours d'eau souterrains qu'on nomme *sources*. C'est pour aller chercher l'eau de ces sources qu'on creuse les puits.

86. **Puits artésiens.** — Lorsque la source qui alimente un puits vient d'un lieu très-élevé au-dessus du sol où est creusé ce puits, il peut arriver que l'eau tende à s'élever dans le puits beaucoup plus haut que le sol; c'est ce qui arrive dans les *puits artésiens*, ainsi nommés parce qu'ils ont d'abord été pratiqués dans l'ancienne province d'Artois.

Ces puits sont des trous très-étroits, forés au moyen d'une sonde. Leur profondeur est très-variable d'une localité à une autre. Pour en comprendre la théorie, il faut savoir que l'écorce de notre globe est formée de terrains fort divers, les uns perméables aux eaux, tels sont les sables et les graviers; les autres, imperméables, ce sont les terrains argileux. Cela posé, soit une vallée H (fig. 57), au-dessous de laquelle se trouve une couche imperméable AB; puis, au-dessous de cette couche, un terrain perméable K; et enfin, au-dessous de celui-ci, une deuxième couche imperméable CD. Les eaux de pluie qui tombent à la surface du sol, entre les points A et C, ou entre les points B et D, s'infiltrent dans le terrain perméable K, à la partie inférieure

duquel elles s'amassent sans trouver aucune issue pour s'écouler, étant retenues par les deux couches imperméables. Mais si, à partir du sol, on perce un trou I, qui, descendant au-dessous de la première couche imperméable, atteigne le terrain où les eaux se sont amassées, celles-ci, cherchant toujours à se mettre de niveau, s'élèvent dans le trou, et tendent à jaillir au-dessus du sol à une hauteur d'autant plus grande qu'elles communiquent, dans le ter-

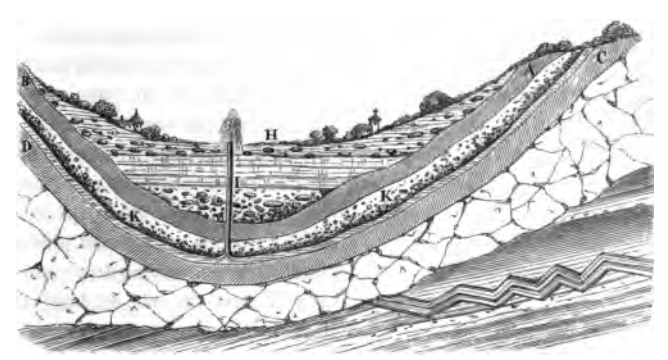


Fig. 57. — Puits artésien.

rain perméable, avec des eaux plus élevées au-dessus de l'orifice du trou; de là des puits jaillissants.

Les eaux qui alimentent les puits artésiens arrivent souvent de très-loin. Celles du puits de Grenelle, à Paris, viennent de la Champagne, contrée beaucoup plus élevée que Paris. La profondeur de ce puits est de 548 mètres, c'est-à-dire plus d'un demi-quart de lieue. Il donne 3000 litres d'eau par minute. C'est un des puits les plus abondants et les plus profonds qu'on ait percés. L'eau qui s'en dégage est, toute l'année, à la température de 27 degrés, phénomène dont nous verrons plus tard la cause.

CHAPITRE III

PRESSIONS SUPPORTÉES PAR LES CORPS IMMERGÉS, POIDS SPÉCIFIQUES, ARÉOMÈTRES.

87. **Effet de la pression des liquides sur les corps immergés.** — Lorsqu'un corps solide est plongé dans un liquide, il est évident que les pressions que celui-ci exerce sur les parois du vase qui le contient se font aussi sentir sur la surface du corps immergé, puisqu'on sait que dans les liquides les pressions se transmettent en tous sens (69). Or, il est facile de reconnaître que les pressions que supportent alors les corps immergés ne se détruisent pas toutes mutuellement, mais ont une résultante qui agit de bas en haut et tend sans cesse à soulever ces corps.

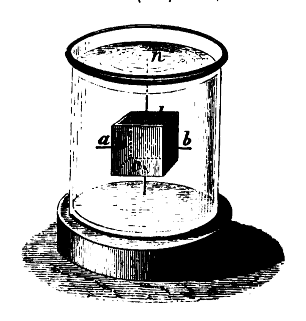


Fig. 58. — Pressions supportées par les corps immergés.

Pour cela, soit un corps de forme quelconque, un cube, par exemple, plongé dans un vase d'eau (fig. 58). Si l'on considère d'abord les pressions horizontales exercées sur deux faces opposées *a* et *b*, on voit qu'elles sont de même intensité, comme s'exerçant à la même profondeur (70); de plus, elles sont de directions contraires, donc elles se font équilibre, et n'ont pour effet que de comprimer le cube, mais ne tendent nullement à le déplacer.

Quant aux pressions verticales qui s'exercent sur les faces *d* et *c*, il est facile de reconnaître qu'elles sont inégales. En effet, la face supérieure *d* supporte, de haut en bas, une pression égale au poids d'une colonne d'eau qui aurait pour base cette face et pour hauteur *dn* (73), tandis que la face inférieure *c* supporte, de bas en haut, une poussée égale au poids de la colonne d'eau qui aurait pour base cette face et pour hauteur *cn* (72). Or, cette dernière pres-

sion est plus grande que la première précisément de tout le poids de l'eau déplacée par le cube.

Nous arrivons donc, par le raisonnement, à ce principe remarquable que *tout corps plongé dans un liquide tend à être soulevé par une pression égale au poids du volume de liquide qu'il déplace*. On va voir comment le même principe se démontre par l'expérience.

88. **Principe d'Archimède, balance hydrostatique.** — Puisqu'on vient de reconnaître que tout corps plongé dans un liquide supporte de bas en haut une poussée égale au poids du liquide déplacé, il est évident que ce corps doit alors perdre une partie de son poids, qu'il doit peser moins que dans l'air, et que la diminution de poids qu'il subit doit précisément être égale à celui du liquide qu'il déplace. On peut donc énoncer le principe donné ci-dessus de la manière suivante : *tout corps plongé dans un liquide y perd une partie de son poids égale à celui du liquide qu'il déplace*. Par exemple, un corps qui, dans l'air, pèse 18 kilogrammes, et qui, plongé dans l'eau, déplace 3 litres d'eau, c'est-à-dire 3 kilogrammes, ne pèse dans ce liquide que 18 moins 3, ou 15 kilogrammes.

Ce principe, remarquable par ses nombreuses applications, se démontre au moyen de la *balance hydrostatique*. On nomme ainsi une balance qui ne diffère des balances ordinaires que parce que chaque plateau est muni d'un petit crochet auquel on peut suspendre le corps à peser, et parce que le fléau peut s'élever ou s'abaisser à volonté. Pour cela, la colonne *d* (fig. 59), qui sert de pied à la balance, est creuse, et dans son intérieur glisse une tige *c* qui porte le fléau. D'une main on élève ou on abaisse cette tige et en même temps le fléau, de la quantité nécessaire à l'expérience, et de l'autre main on la fixe solidement à la hauteur voulue, en serrant une vis de pression *n*.

Cela posé, la balance étant remontée plus haut que le montre le dessin, on suspend, à l'un des plateaux, un cylindre de cuivre *b*, qui est creux, et, au-dessous, un second cylindre *a*, qui est plein et d'un volume exactement égal à la capacité du premier; puis on met des poids dans l'autre plateau de manière à faire équilibre aux deux cylindres, ce qui a lieu quand le fléau est bien horizontal.

Si alors on remplit d'eau le cylindre *b*, l'équilibre est rompu ; mais si, en même temps, on desserre la vis *n*, et on abaisse la tige *c* et le fléau, de manière que le cylindre *a* plonge entièrement dans un vase plein d'eau placé au-dessous, on voit l'équilibre se rétablir. Il faut donc que, par son immersion dans l'eau, le cylindre *a*



Fig. 59. — Balance hydrostatique servant à démontrer le principe d'Archimède.

perde une partie de son poids rigoureusement égale à celui de l'eau versée dans le cylindre *b*, et, par suite, égale au poids de l'eau qu'il déplace, puisque le volume du cylindre immergé est précisément le même que la capacité du cylindre creux.

Le principe célèbre que tout corps plongé dans un liquide y perd une partie de son poids égale à celui du liquide qu'il déplace, est connu sous le nom de ***principe d'Archimède***, parce que c'est

Archimède, illustre géomètre de l'antiquité, mort à Syracuse, 212 ans avant l'ère chrétienne, qui l'a découvert.

On rapporte qu'il fit cette découverte à l'occasion d'un problème qui lui avait été posé par Hiéron, tyran de Syracuse. Ce prince voulant offrir à Jupiter une couronne d'or, avait remis à un orfévre 10 livres d'or destinées à la fabrication de la couronne. Celle-ci terminée se trouva bien, en effet, peser 10 livres; mais Hiéron, soupçonnant que l'orfévre s'était approprié une certaine quantité d'or qu'il avait remplacée par de l'argent, demanda à Archimède un moyen de reconnaître la fraude, mais sans altérer la couronne, à cause de la beauté du travail.

L'habile géomètre, préoccupé de la solution du problème que lui avait posé Hiéron, était au bain, lorsqu'il remarqua que dans l'eau il pouvait soulever ses membres bien plus facilement que dans l'air. Cette observation si simple fut pour lui un trait de lumière; il en déduisit le principe démontré ci-dessus, principe qui, ainsi que nous le verrons bientôt (94), lui donnait le moyen de trouver combien l'or, l'argent et l'alliage dont était composée la couronne pesaient respectivement par rapport à l'eau. Une fois cette notion acquise, un calcul simple lui faisait connaître combien la couronne contenait d'or et d'argent. On dit qu'Archimède éprouva une joie si vive du principe qu'il avait découvert, qu'il s'élança hors du bain et courut à sa maison, en criant dans les rues de Syracuse : *Je l'ai trouvé! je l'ai trouvé!*

Nous avons tous été à même de faire la remarque que fit Archimède, et d'observer combien nos membres nous paraissent légers lorsque nous sommes plongés dans l'eau d'une baignoire, et, au contraire, combien ils nous semblent lourds au moment où nous les élevons au-dessus de l'eau. De même, si le corps presque entièrement plongé dans l'eau, on marche pieds nus sur le rivage de la mer, les cailloux et les graviers qui recouvrent le sol ne blessent pas les pieds; mais si, une fois sorti de l'eau, on continue à marcher sur la grève, on ressent que ces mêmes cailloux, inoffensifs il n'y a qu'un instant, font maintenant éprouver une vive douleur aux pieds et les écorchent. C'est que dans l'eau, le corps du baigneur est en partie soulevé par le liquide, tandis que sorti de l'eau, il presse de tout son poids la plante des pieds contre le sol.

89. Équilibre des corps immergés et des corps flottants. — Lorsqu'un corps plonge dans un liquide, il peut se présenter trois cas : il a même densité que ce liquide, c'est-à-dire pèse autant que lui, à volume égal ; ou bien il est plus dense, et alors il pèse davantage ; ou, enfin, il est moins dense, et dans ce cas il pèse moins que le liquide.

1° Si le corps immergé dans le liquide a la même densité que lui, le poids du liquide déplacé étant alors égal à celui du corps, il résulte du principe d'Archimède que la poussée de bas en haut, qui tend à soulever le corps, est égale à la force avec laquelle la pesanteur le sollicite à descendre ; il y a donc équilibre entre ces deux forces, et, par suite, le corps reste en suspension au milieu du liquide. C'est ce qu'on observe pour les poissons, qui, ayant même densité que l'eau, peuvent s'y maintenir naturellement sans s'élever ni s'abaisser.

2° Si le corps immergé est plus dense que le liquide, il tombe au fond, car c'est alors son poids qui l'emporte sur la poussée de bas en haut. C'est ce qui arrive à une pierre, à une masse métallique qu'on jette dans l'eau.

3° Enfin, si le corps immergé est moins dense que le liquide, c'est la poussée de bas en haut qui prédomine, et le corps prend alors un mouvement ascensionnel jusqu'à ce qu'étant en partie sorti du liquide, il ne déplace plus qu'un poids d'eau égal au sien. On dit alors qu'il *flotte*. Le liége, la cire, le bois et tous les corps plus légers que l'eau, flottent à sa surface.

Tel corps qui flotte sur un liquide irait au fond dans un autre ; il suffit pour cela qu'il soit moins dense que le premier, mais plus dense que le second. Par exemple, qu'on mette un œuf dans de l'eau ordinaire, il va au fond, parce qu'à volume égal il pèse davantage ; mais qu'on le plonge dans de l'eau fortement salée, qui est plus dense que l'eau pure, il surnage. Un morceau de chêne flotte sur l'eau ; mais dans l'huile, qui est moins dense, il est submergé. Une masse de fer surnage dans un bain de mercure, dans l'eau elle s'enfonce immédiatement.

Toutefois, un corps, quoique plus dense qu'un liquide, peut flotter à sa surface. Il suffit pour cela de donner à ce corps une forme telle qu'il déplace un poids de liquide plus considérable que

le sien. Par exemple, la porcelaine est plus pesante que l'eau, et cependant une soucoupe de porcelaine, posée sur l'eau, flotte à sa surface; cela résulte de sa forme concave, en vertu de laquelle elle déplace un poids d'eau égal au sien, quoiqu'elle ne soit qu'en partie immergée. C'est par la même raison que les navires en fer, dont l'usage est fort répandu aujourd'hui, flottent librement à la surface des fleuves et des mers.



Fig. 60. — Ludion.

90. **Ludion.** — On trouve dans les cabinets de physique un petit appareil nommé ***ludion***, à l'aide duquel on reproduit à volonté les effets de suspension, d'immersion ou de flottaison d'un corps solide dans un liquide. Il se compose d'un vase de verre long et étroit, surmonté d'un cylindre de cuivre A (fig. 60), dans lequel est un piston qu'on fait monter ou descendre à la main, et qui ferme hermétiquement le vase. Celui-ci est en partie plein d'eau, et dans le liquide est un corps léger, un petit poisson, par exemple, qui est en émail et creux. Cet objet est suspendu à une petite boule de verre *m*, qui contient de l'air et de l'eau, et qui est percée à sa partie inférieure, en *o*, d'un petit trou par lequel de l'eau peut pénétrer dans la boule ou en sortir, selon que l'air qu'elle contient est plus ou moins comprimé. Enfin, à la pression ordinaire, la boule flotte à la surface de l'eau, mais un très-petit excès de poids suffit pour la faire s'immerger tout à fait, et tomber au fond du vase. Par conséquent, si l'on fait descendre, avec la main, le piston qui est dans le cylindre de cuivre, l'air qui est au haut du vase se trouve comprimé; cette pression se transmet à l'eau du vase, puis à l'eau et à l'air qui sont dans la boule, à l'aide du petit trou *o*. L'air qui est dans cette boule se trouvant

alors réduit de volume, un peu d'eau y pénètre, par suite son poids augmente, et elle tombe avec l'objet qu'elle soutenait. Si l'on soulève le piston, la pression cesse, l'air comprimé dans la boule se détend, chasse l'excès d'eau qui y a pénétré, et le corps immergé, devenu plus léger, remonte.

91. **Vessie natatoire des poissons.** — On trouve chez un grand nombre de poissons une vessie pleine d'air qu'on nomme *vessie natatoire*, laquelle est placée dans l'abdomen au-dessous de l'épine dorsale. Au moyen de cette vessie les poissons s'élèvent ou s'abaissent au sein des eaux à toutes les profondeurs, et s'y maintiennent à volonté. Veulent-ils descendre, ils la compriment par un effort musculaire, et déplaçant alors moins d'eau, leur poids l'emporte sur celui du liquide qu'ils déplacent, ce qui les fait descendre sans efforts. Au contraire, s'ils veulent s'élever, il suffit qu'ils relâchent les muscles qui comprimaient la vessie; celle-ci se dilate aussitôt en vertu de l'élasticité de l'air qu'elle contient, et le poisson augmentant alors de volume, sans augmenter de poids, la poussée du liquide le fait remonter.

92. **Natation.** — Le corps humain est plus léger que l'eau et tend, par conséquent, à flotter naturellement à la surface de ce liquide et surtout sur l'eau salée des mers, qui est plus dense que l'eau douce. Il résulte de là que pour le nageur, ou pour une personne tombée à l'eau, la difficulté n'est pas tant de se maintenir à la surface que de conserver la tête hors du liquide, afin de respirer librement. En effet, chez l'homme, la tête ayant un grand poids par rapport aux membres inférieurs, elle tend à plonger la première, et de l'eau pénétrant alors dans la poitrine, le corps devient plus pesant que le liquide qu'il déplace, ce qui amène l'immersion totale. Aussi la natation n'est-elle pas naturelle à l'homme, mais un art qu'il doit étudier. Chez les quadrupèdes, au contraire, la tête, pesant moins que la partie postérieure du corps, peut demeurer sans effort hors de l'eau; c'est pourquoi ces animaux nagent naturellement.

Si une personne qui ne sait pas nager et qui tombe à l'eau, conservait assez de sang-froid pour se tourner sur le dos de manière que ce fût la face qui se trouvât hors de l'eau, elle pourrait alors respirer librement et attendre qu'on lui portât secours. Mais au

lieu de cela, on fait, en général, tous ses efforts pour élever les bras hors de l'eau, comme pour saisir dans l'espace un point d'appui et s'y suspendre. Or, cette tendance à s'élever hors de l'eau est très-funeste, car les bras ne perdant plus de leur poids une partie égale à celui du liquide déplacé, tout leur poids vient s'ajouter à celui de la tête pour la faire enfoncer.

A poids égal, les personnes grasses nagent plus aisément que les maigres, parce qu'elles déplacent plus d'eau. C'est pour la



Fig. — 61. Application du principe d'Archimède.

même raison qu'on attache des vessies gonflées d'air, ou des ceintures de liége, au corps des personnes qui apprennent à nager (fig. 61); car alors, sans augmenter notablement de poids, elles déplacent beaucoup plus d'eau, ce qui augmente la poussée qui tend à les soulever.

Plusieurs espèces d'oiseaux, comme les canards, les oies, les cygnes, se maintiennent sans effort à la surface de l'eau; ils doivent cette faculté à une couche épaisse d'un duvet léger et imperméable qui chez eux recouvre la partie inférieure du corps et leur fait déplacer, pour une faible immersion, un poids d'eau égal au leur.

POIDS SPÉCIFIQUES, ARÉOMÈTRES.

93. **Poids spécifiques.** — L'expérience journalière nous montre que les différentes substances, sous le même volume, possèdent des poids très-inégaux. Par exemple, tout le monde a observé que l'or pèse plus que l'argent, le plomb plus que le fer, les pierres plus que les bois. Pour comparer les diverses substances entre elles sous

le point de vue de leur poids, à volume égal, on a pris pour terme de comparaison, ***pour unité***, le poids de l'eau, substance qui se trouve partout et qu'on peut toujours obtenir à l'état de pureté, condition nécessaire à remplir, car le poids d'un volume donné d'eau, d'un litre, par exemple, varie avec les substances qu'elle tient en dissolution. De plus, comme ce poids varie aussi avec la température, ainsi que nous le verrons plus tard, il a fallu adopter une température constante. On a donc choisi ***pour unité*** le poids de ***l'eau distillée***, qui est parfaitement pure, et on a pris cette eau ***à la température de quatre degrés***. On verra, dans l'étude de la chaleur, quel est le motif qui a conduit les physiciens à adopter cette température.

Cela posé, le poids de l'eau distillée et à quatre degrés étant pris pour unité, on nomme ***poids spécifique*** d'un corps, son poids par rapport à celui de l'eau, à volume égal; ou, ce qui est la même chose, le nombre qui exprime combien pèse ce corps comparativement à l'eau. Par exemple, quand on dit que le poids spécifique de l'or est 19, que celui du plomb est 11, cela signifie qu'à volume égal, le premier de ces métaux pèse dix-neuf fois plus que l'eau, et le second, onze fois plus.

Nous allons faire connaître les procédés qui ont servi à déterminer les poids spécifiques des solides et des liquides, ne devant parler que plus tard des poids spécifiques des gaz. Observons seulement dès à présent que tandis que les poids spécifiques des solides et des liquides ont été déterminés par rapport à l'eau, ceux des gaz l'ont été par rapport à l'air.

94. Détermination des poids spécifiques des solides. — Puisque le poids spécifique d'un corps n'est autre chose que l'expression du nombre qui marque combien ce corps pèse par rapport à l'eau, à volume égal, il est évident que, pour déterminer ce nombre, il n'y a qu'à trouver le poids du corps, puis celui d'un égal volume d'eau, et à chercher enfin combien de fois le premier poids contient le second. On arrive à cette détermination par trois méthodes : celle de la balance hydrostatique, celle de l'aréomètre, et celle du flacon.

1° ***Méthode de la balance hydrostatique.*** — Pour déterminer, au moyen de la balance hydrostatique, le poids spécifique d'un

corps solide, on le suspend par un fil fin au crochet de l'un des plateaux, et on le pèse ainsi dans l'air, en mettant dans l'autre plateau des poids jusqu'à ce que l'équilibre soit établi. Supposons que le corps dont on cherche le poids spécifique soit un morceau de fer, et que son poids ainsi obtenu soit 39 grammes. Laissant encore ce morceau de fer suspendu à la balance, on le fait plonger



Fig. 62. — Détermination des poids spécifiques par la balance hydrostatique.

dans un vase contenant de l'eau distillée, et on le pèse de nouveau ainsi immergé, comme le montre la figure 62. On trouve alors qu'il pèse moins que la première fois, 34 grammes, par exemple; ce qui devait être, puisque, d'après le principe d'Archimède, il perd actuellement une partie de son poids égale à celui de l'eau qu'il déplace. Par conséquent, si de 39 on retranche 34, la différence 5 représente le poids du volume d'eau déplacé, c'est-à-dire le poids d'un volume d'eau égal à celui du morceau de fer. Il ne reste donc plus qu'à chercher combien de fois le poids 39^{gr} du

morceau de fer contient le poids 5gr d'un égal volume d'eau, ce qui s'obtient en divisant 39 par 5. On trouve pour quotient 7,8, nombre qui représente le poids spécifique du fer, et qui montre qu'à volume égal cette substance pèse sept fois et huit dixièmes autant que l'eau.

2° ***Méthode de l'aréomètre de Nicholson.*** — Nicholson, physicien anglais, a imaginé un petit appareil flotteur qui sert, comme la balance hydrostatique, à déterminer les poids spécifiques des corps solides. Cet appareil, connu sous le nom d'***aréomètre de Nicholson***, est formé d'un cylindre de fer-blanc, creux, portant à sa partie inférieure un cône *d* (fig. 63) rempli de plomb, afin de lester l'appareil, c'est-à-dire d'abaisser son centre de gravité de manière qu'il ne chavire pas lorsqu'il est dans l'eau. A la partie supérieure de l'aréomètre est fixée une tige de fer *c*, qui porte une petite cuvette *a*, dans laquelle on peut placer des poids; sur la tige est marqué, en *c*, un petit trait destiné à servir de point de repère; c'est le ***point d'affleurement***, ainsi nommé parce qu'on doit toujours faire plonger l'aréomètre jusqu'à ce point. Enfin, ajoutons que le poids de l'instrument doit être réglé de telle sorte que lorsqu'il plonge dans l'eau et n'est chargé d'aucun poids, il n'enfonce que des trois quarts environ de sa hauteur, comme le représente la figure 63.

Cela posé, pour déterminer le poids spécifique d'un corps, à l'aide de l'aréomètre de Nicholson, on commence par peser ce corps avec l'aréomètre même comme on le ferait avec une balance ordinaire. A cet effet, on plonge l'aéromètre dans l'eau, puis on pose des poids sur la cuvette *a*, jusqu'à ce que l'instrument s'enfonce au point d'affleurement *c*, comme le montre la figure 64. Supposons qu'il ait fallu pour cela 75 grammes; enlevant alors ces poids, on met à leur place le corps dont on désire connaître le poids spécifique, ayant eu le soin d'avance de prendre ce corps assez léger pour qu'il ne fasse pas affleurer tout à fait. Puis ajoutant peu à peu des grammes dans la cuvette, à côté du corps qu'on y a placé, on arrive à faire enfoncer l'aréomètre juste au point d'affleurement. Admettons qu'il ait fallu pour cela 15 grammes; puisque actuellement que le corps est sur la cuvette il ne faut que 15 grammes pour obtenir l'affleurement, tandis qu'avant il en fallait 75, c'est-

à-dire 60 grammes de plus, on en conclut que le corps pèse 60 grammes. C'est là son poids dans l'air, celui qu'on aurait trouvé en le pesant dans une balance ordinaire.

Il reste à trouver le poids d'un égal volume d'eau. Pour cela, on retire l'aréomètre de l'eau, et on porte le corps qu'on vient de peser de la cuvette *a* sur le plateau *d* formé par le cône renversé

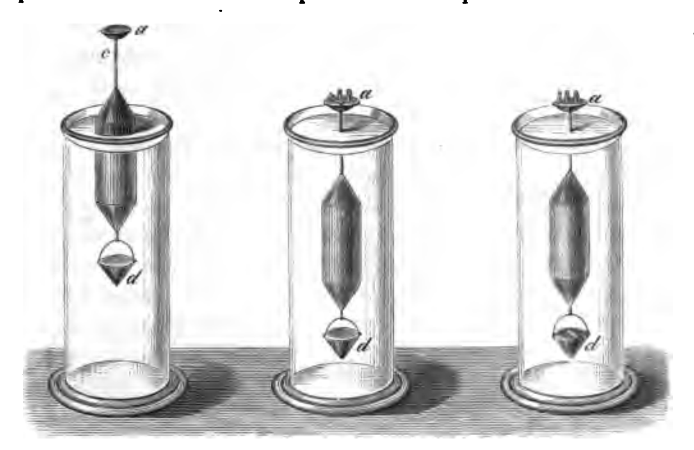


Fig. 63. Fig. 64. Fig. 65.

Détermination des poids spécifiques par l'aréomètre de Nicholson.

qui est à la partie inférieure de l'appareil, comme le montre la figure 65. L'aréomètre étant alors replacé dans l'eau, on remarque qu'il n'affleure plus, ce qui provient de ce que le corps qu'on vient de placer dans le plateau *d*, étant actuellement immergé, perd une partie de son poids égale au poids de l'eau qu'il déplace. Par conséquent, si l'on met dans la cuvette *a* des poids jusqu'à ce que l'affleurement se rétablisse, 10 grammes par exemple, ce nombre représente le poids du volume d'eau déplacé, c'est-à-dire du volume d'eau égal à celui du corps. Il ne reste donc plus qu'à diviser 60 grammes, poids du corps, par 10 grammes, poids de l'eau; le quotient 6 est le poids spécifique cherché.

3° *Méthode du flacon.* — La méthode du flacon n'est employée que pour les corps en poudre, comme le sable. Elle consiste à peser

un petit flacon plein d'eau, avec le corps en poudre placé à côté du flacon, dans le même plateau de la balance; puis on introduit la poudre dans le flacon, et on pèse de nouveau celui-ci toujours plein d'eau. Il y a alors une diminution de poids résultant de l'eau chassée du flacon par la poudre. Or, cette diminution de poids n'étant autre chose que le poids de l'eau déplacée par la poudre, il est évident qu'on aura le poids spécifique de celle-ci en divisant son poids dans l'air, qu'on doit avoir soin de déterminer d'avance, par la diminution qu'on a observée après avoir versé la poudre dans le flacon.

95. **Détermination des poids spécifiques des liquides.** — Les poids spécifiques des liquides se déterminent par les mêmes méthodes que ceux des corps solides, savoir : la méthode de la balance hydrostatique, celle de l'aréomètre et celle du flacon.

1° ***Méthode de la balance hydrostatique.*** — Pour trouver le poids spécifique d'un liquide par le procédé de la balance hydrostatique, on suspend à l'un des plateaux de cette balance un corps qui ne soit soluble ni dans l'eau ni dans le liquide dont on cherche le poids spécifique, par exemple une boule de platine, métal inattaquable par tous les liquides. Puis on pèse cette boule dans l'air, ensuite plongée dans l'eau distillée, et enfin plongée dans le liquide dont on veut avoir le poids spécifique, liquide que nous supposerons être de l'alcool. Cela posé, admettons que dans l'air la boule de platine pèse 33 grammes, dans l'eau 31 gr,5, et dans l'alcool 31 gr,7. La perte de poids dans l'eau a donc été 33 gr moins 31 gr,5 ou 1 gr,5; et la même perte dans l'alcool, 33 gr moins 31 gr,7, ou 1 gr,3; ce qui nous apprend qu'un volume d'eau égal à celui de la boule de platine pesant 1 gr,5, le même volume d'alcool pèse 1 gr,3. Par conséquent, pour avoir le poids de l'alcool par rapport à l'eau, il n'y a plus qu'à chercher combien de fois le nombre 1 gr,3 contient 1 gr,5, ce qui s'obtient en divisant 1,3 par 1,5. On trouve pour quotient 0,866; tel est donc le poids spécifique de l'alcool, poids qui exprime qu'à volume égal le poids de l'alcool n'est que les 866 millièmes de celui de l'eau.

2° ***Méthode de l'aréomètre de Fahrenheit.*** — Fahrenheit, physicien prussien, né à Dantzick à la fin du XVIIe siècle, a imaginé, pour déterminer les poids spécifiques des liquides, un aréomètre qui porte son nom, et qui a beaucoup de rapport avec celui de

Nicholson. Cet instrument, représenté dans la figure 66, est en verre et lesté, à sa partie inférieure, par une boule remplie de mercure. Sa tige porte encore un trait fixe servant de point d'affleurement.

Cela posé, avant d'expérimenter avec cet instrument, on commence par en déterminer le poids en le pesant dans une balance



Fig. 66. — Aréomètre de Fahrenheit.

ordinaire. Supposons que ce poids soit 40 grammes, et que le liquide dont on cherche le poids spécifique soit de l'huile d'olive. On plonge l'aréomètre d'abord dans de l'eau distillée, dans laquelle il ne doit s'enfoncer que jusqu'aux deux tiers ou aux trois quarts environ de sa hauteur, et on achève de le faire affleurer en mettant successivement des poids dans la cuvette *a*, jusqu'à ce que le point d'affleurement atteigne le niveau de l'eau, comme le montre le dessin. Admettons qu'il ait fallu pour cela ajouter 6 grammes dans la cuvette. Ces 6 grammes, ajoutés aux 40 grammes que pèse l'aréomètre, donnent 46 grammes pour poids de l'eau déplacée par l'instrument, puisqu'on a vu (89) que tout corps ne flotte à la surface d'un liquide qu'à la condition de déplacer un poids de ce

liquide égal au sien. Ce résultat obtenu, on retire l'aréomètre de l'eau, on l'essuie, et on le plonge dans un vase plein d'huile d'olive. Ici encore il ne doit pas enfoncer jusqu'au point d'affleurement, mais on l'y fait arriver en mettant dans la cuvette un certain nombre de grammes, 2 par exemple. Ces 2 grammes, ajoutés aux 40 grammes que pèse l'instrument, représentent un poids total de 42 grammes, qui est le poids de l'huile déplacée. Or, le volume d'huile est précisément égal à celui de l'eau que déplaçait d'abord l'aréomètre, puisque, dans les deux cas, il plonge de la même quantité. On est donc arrivé à savoir qu'à volume égal, l'huile d'olive pèse 42 grammes et l'eau 46. Par conséquent, on aura le poids spécifique de l'huile d'olive par rapport à l'eau, en cherchant combien de fois 42 contient 46, c'est-à-dire en divisant 42 par 46. On trouve pour quotient 0,91, nombre qui représente le poids spécifique cherché, et qui nous apprend qu'un certain volume d'eau pesant 100 grammes, le même volume d'huile d'olive ne pèse que 91 grammes.

3° *Méthode du flacon.* — On détermine encore les poids spécifiques des liquides par une troisième méthode connue sous le nom de *méthode du flacon.* Elle consiste à peser un petit flacon de verre, d'abord quand il ne contient aucun liquide; puis successivement plein d'eau et plein du liquide dont on cherche le poids spécifique, d'alcool, par exemple. Retranchant ensuite des deux dernières pesées le poids du flacon, on a pour restes le poids de l'eau et celui de l'alcool, sous le même volume. Si donc on divise le second poids par le premier, le quotient obtenu sera le poids spécifique cherché.

Poids spécifiques des solides.

Platine	22,07	Diamant	3,53
Or	19,34	Marbre blanc	2,84
Plomb	11,35	Verre	2,49
Argent	10,47	Ivoire	1,92
Cuivre rouge	8,88	Bois de hêtre	0,85
Fer	7,79	Peuplier commun	0,39
Zinc	7,00	Liége	0,24

Poids spécifiques des liquides.

Mercure.	13,60	Vin de Bordeaux.	0,99
Acide sulfurique. . . .	1,84	Huile d'olive.	0,91
Lait.	1,03	Essence de térébenthine.	0,87
Eau de mer.	1,03	Alcool absolu.	0,79
Eau distillée.	1,00	Éther ordinaire.	0,71

A l'inspection de ces deux tableaux, on reconnaît que le plus lourd des solides est le platine, et le plus lourd des liquides le mercure.

96. **Usages des poids spécifiques.** — La détermination des poids spécifiques n'a pas un but purement théorique. La connaissance de ces nombres présente de nombreuses applications. Par exemple, les naturalistes s'en servent pour déterminer les espèces minérales d'après leur densité. De même, les joailliers les emploient pour reconnaître les pierres précieuses. Enfin, la connaissance du poids spécifique d'un corps fournit le moyen de déterminer très-simplement son poids, lorsqu'on connaît son volume. Supposons, par exemple, qu'on veuille trouver le poids d'un mètre cube de plomb. Commençons par observer qu'un mètre cube contient 1000 décimètres cubes. Or, on sait, dans le système métrique, qu'un décimètre cube d'eau, ou un litre, pèse 1 kilogramme. Par conséquent, si au lieu d'un mètre cube de plomb, on avait un mètre cube d'eau, le poids en serait de 1000 kilogrammes. Mais, d'après le tableau ci-dessus, le plomb pèse 11,35 fois plus que l'eau; donc un mètre cube de plomb doit peser 11,35 fois plus qu'un mètre cube d'eau, c'est-à-dire 11,35 fois 1000^k, ou 11350 kilogrammes. On voit donc qu'*on obtient le poids d'un corps, en kilogrammes, en multipliant le poids spécifique de ce corps par son volume mesuré en décimètres cubes.*

ARÉOMÈTRES A POIDS CONSTANT.

97. **Aréomètre de Baumé.** — On a pu remarquer que les deux petits flotteurs qui viennent d'être décrits sous les noms d'*aréo-*

mètre de Nicholson et d'***aréomètre de Fahrenheit*** doivent toujours enfoncer jusqu'au même point, qui est leur point d'affleurement, et, par conséquent, que le volume immergé est constant; de là le nom d'***aréomètres à volume constant*** qu'on leur a donné. De plus, comme pour les faire affleurer il faut les charger de poids inégaux, selon la substance dont on cherche le poids spécifique, on les désigne encore sous le nom d'***aréomètres à poids variable.***

Or, il existe une autre espèce d'aréomètres qui sont, au contraire, à ***volume variable*** et à ***poids constant***, c'est-à-dire qu'ils n'ont pas de point d'affleurement fixe, et conservent toujours le même poids. Ces instruments, qui sont connus sous les noms de ***pèse-sels, pèse-acides, pèse-liqueurs***, et qui n'ont d'usage que pour les liquides, ne sont point destinés à faire connaître leurs poids spécifiques; mais si une liqueur quelconque, une dissolution sucrée ou saline, un acide, un esprit, sont plus ou moins concentrés, c'est-à-dire plus ou moins riches en sucre, en sel, en principe acidifiant, en alcool.

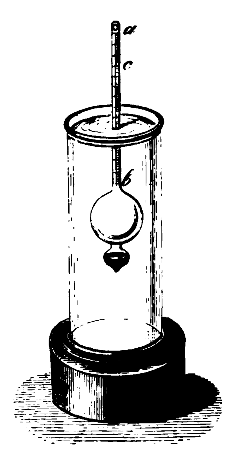


Fig. 67. — Pèse-sels de Baumé.

Tel est l'aréomètre inventé par Baumé, pharmacien à Paris, à la fin du siècle dernier. Ce petit instrument, qui est entièrement en verre, est représenté dans la figure 67 à peu près au quart de sa grandeur. Il se compose d'une tige ***ab***, soudée à une boule un peu grosse, remplie d'air, laquelle supporte une seconde boule plus petite, pleine de mercure, et destinée à lester l'aréomètre, c'est-à-dire à l'empêcher de chavirer.

Sur la tige est une échelle graduée de la manière suivante : ayant réglé le poids de l'instrument de façon que, dans l'eau distillée et à la température de 4 degrés, il plonge à peu près jusqu'à l'extrémité supérieure de sa tige, on marque zéro au point *a* où a lieu alors l'affleurement. Puis, formant une dissolution de 85 parties d'eau, en poids, et 15 de sel marin (sel de cuisine), on y

plonge l'aréomètre. Cette dissolution étant plus dense que l'eau pûre, la tige ne plonge plus que jusqu'à un certain point *c*, où l'on marque 15. On partage ensuite l'intervalle du point *a* au point *c* en 15 parties égales, et on continue les mêmes divisions jusqu'au bas de la tige. Ces divisions, ou degrés, sont tracées sur une petite bande de papier renfermée dans le tube qui forme la tige.

Ainsi gradué, l'aréomètre constitue un *pèse-sels* et aussi un *pèse-acides*. Il ne fait point connaître le poids spécifique des dissolutions salines ou acides, ni la quantité de sel ou d'acide contenue dans ces dissolutions; mais il est néanmoins employé avec avantage dans l'industrie et dans l'économie domestique. Par exemple, dans la fabrication des sirops ordinaires, l'expérience a appris que l'aréomètre de Baumé doit, à chaud, marquer 35 degrés dans un sirop contenant la quantité de sucre convenable. Si l'aréomètre marquait plus, 38 degrés par exemple, il y aurait trop de sucre; s'il marquait moins, il n'y en aurait pas assez. C'est donc là, pour la personne qui fabrique un sirop, un moyen simple de se guider pour le dosage du sucre.

De même, l'expérience apprend que l'aréomètre de Baumé, plongé dans de l'eau de mer, à la température des bains, marque 3 degrés; de là, une indication pour les bains de mer artificiels que les médecins prescrivent dans certaines affections. La quantité de sel qu'ils ordonnent est généralement beaucoup trop faible. Mais si l'on a un pèse-sels de Baumé, il sera toujours facile de faire soi-même un bain artificiel qui se rapproche beaucoup d'un bain de mer naturel; il n'y aura qu'à jeter peu à peu du sel marin dans le bain, en ayant soin d'agiter, jusqu'à ce que l'aréomètre marque 3 degrés.

Baumé a aussi construit un pèse-liqueurs, qui a beaucoup de rapport avec son pèse-sels; mais Gay-Lussac ayant depuis construit un pèse-liqueurs bien plus précis, nous ne décrirons que ce dernier.

98. **Alcoomètre centésimal de Gay-Lussac.** — Les eaux-de-vie et les esprits-de-vin employés dans le commerce et dans l'économie domestique sont formés d'alcool pur et d'eau; moins ils contiennent d'eau, plus ils sont forts; plus ils en contiennent, plus ils

sont faibles et moins ils ont de valeur. Il importe donc, dans le commerce, de pouvoir déterminer exactement la quantité d'eau contenue dans une eau-de-vie donnée. C'est à quoi on parvient très-simplement à l'aide de l'alcoomètre de Gay-Lussac.

Ce petit instrument, représenté dans la figure 68, plongeant dans une éprouvette pleine d'esprit-de-vin, a tout à fait la forme de l'aréomètre de Baumé, dont il ne diffère que par la graduation, qui est telle que cet alcoomètre n'indique pas seulement si un alcool donné contient plus ou moins d'eau, mais marque juste combien il en contient. Pour opérer cette graduation, Gay-Lussac plongeait d'abord l'instrument dans de l'alcool complétement privé d'eau, et au point d'affleurement, qui doit correspondre à l'extrémité supérieure de la tige, il marquait 100. Puis, ayant formé un mélange, en volume, de 99 parties d'alcool avec 1 partie d'eau, il y plongeait l'instrument, qui s'enfonçait un peu moins qu'auparavant, puisque l'eau ajoutée à l'alcool en augmentait la densité. Au point où avait alors lieu l'affleurement, on marquait 99, c'est-à-dire le volume d'alcool contenu dans le mélange. Faisant ensuite des mélanges composés, sur 100 parties, de 98 d'alcool et 2 d'eau, de 97 d'alcool et 3 d'eau, de 96 d'alcool et 4 d'eau, et ainsi de suite, on plongeait successivement l'instrument dans chacun d'eux, et aux différents points d'affleurement, on marquait 98, 97, 96, etc.

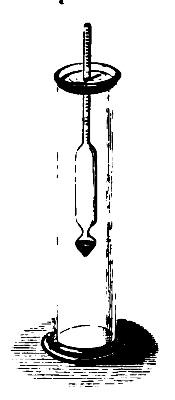


Fig. 68.—Alcoomètre de Gay-Lussac.

L'alcoomètre une fois gradué de la sorte, il est facile d'en concevoir l'usage. En effet, une eau-de-vie étant donnée, on y plonge l'instrument, et si le point d'affleurement correspond, par exemple, au numéro 85 de la tige, cela indique que l'eau-de-vie contient 85 pour 100 d'alcool et 15 d'eau, c'est-à-dire que dans 100 litres de cette eau-de-vie, il entre en réalité 85 litres d'alcool et 15 litres d'eau. On peut donc en apprécier exactement la valeur; toutefois, pour que les indications de l'alcoomètre soient précises, on doit tenir compte, en le graduant, de la contraction que subissent l'eau et l'alcool lorsqu'on les mélange (8), et de la

température du liquide au moment où on y plonge l'alcoomètre.

99. **Lactomètre.** — Le *lactomètre* est un petit instrument qui sert à reconnaître la qualité du lait, et qui a beaucoup de rapport avec l'aréomètre de Baumé, dont il a entièrement la forme, comme on le voit en A (fig. 69); mais sa graduation est différente. Pour la former, on plonge l'instrument dans une terrine pleine de lait pur et de très-bonne qualité, puis, au point d'affleurement, on marque zéro sur une bande de papier contenue dans la tige du lactomètre.

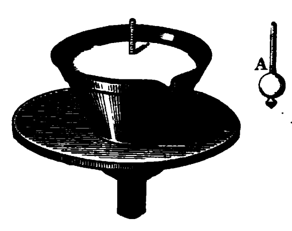


Fig. 69. — Pèse-lait.

Formant ensuite des mélanges de $\frac{9}{10}$ de lait pur et $\frac{1}{10}$ d'eau, de $\frac{8}{10}$ de lait et $\frac{2}{10}$ d'eau, et ainsi de suite jusqu'à $\frac{5}{10}$ de lait et $\frac{5}{10}$ d'eau, on y plonge successivement l'instrument, qui s'enfonce de plus en plus, le lait mélangé d'eau étant moins dense que le lait pur. Marquant alors sur la bande de papier, à chaque point d'affleurement, les nombres $\frac{1}{10}$, $\frac{2}{10}$, $\frac{3}{10}$, $\frac{4}{10}$ et $\frac{5}{10}$ ou $\frac{1}{2}$, on a une échelle destinée à faire connaître la quantité d'eau contenue dans le lait. Toutefois, de ce que le lactomètre marquerait, dans un lait donné, $\frac{3}{10}$, $\frac{4}{10}$ ou $\frac{5}{10}$, on ne pourrait en conclure d'une manière certaine que ce lait aurait été fraudé par une addition d'eau, parce qu'il peut être de mauvaise qualité par lui-même. On serait seulement certain qu'on a un lait pauvre en principes constituants du lait, qui sont le beurre, le sucre de lait, et le caséum.

LIVRE III

DES GAZ.

CHAPITRE PREMIER

PROPRIÉTÉS DES GAZ, ATMOSPHÈRE, BAROMÈTRES.

100. **Des gaz en général.** — On a déjà vu (5) qu'on nomme *gaz*, ou *fluides aériformes*, des substances dont les molécules possèdent une mobilité parfaite, et sont entre elles dans un état constant de répulsion, qu'on désigne sous les noms d'*expansibilité*, de *tension*, de *force élastique*, d'où les gaz sont eux-mêmes désignés sous le nom de *fluides élastiques*.

On connaît, en chimie, trente-quatre gaz différents; quatre seulement sont simples, c'est-à-dire formés d'une seule espèce de matière; ce sont l'oxygène, l'hydrogène, l'azote et le chlore. Quelques gaz sont colorés; mais la plupart sont incolores. Plusieurs répandent une odeur plus ou moins désagréable, d'autres sont complétement inodores. Quelques-uns sont délétères, c'est-à-dire qu'ils sont de véritables poisons pour les animaux qui les respirent; tels sont l'oxyde de carbone, qui provient de la combustion du charbon, et l'hydrogène sulfuré, qui se dégage des fosses d'aisances. Quelques gaz sont inoffensifs, comme l'azote, l'hydrogène; cependant un animal ne peut y vivre. Ils ne sont pas délétères, ils n'empoisonnent pas, mais ils n'entretiennent pas la vie. Un seul gaz, l'oxygène, possède cette propriété; privé de ce gaz, même pendant quelques secondes, un animal périt aussitôt.

Enfin, ajoutons à ces généralités sur les gaz que la plupart d'entre eux peuvent être amenés de l'état aériforme à l'état liquide par l'effet d'une forte pression, ou d'un grand refroidissement, ou par les deux effets combinés. Il n'y a que cinq gaz qui n'aient pu être liquéfiés, à quelque pression et à quelque refroidissement

qu'on les ait soumis ; ce sont l'oxygène, l'hydrogène, l'azote, le bioxyde d'azote et l'oxyde de carbone. Les gaz qui persistent ainsi à l'état aériforme, se désignent sous le nom de *gaz permanents ;* les autres sont dits *gaz non permanents*.

Les propriétés physiques des gaz étant les mêmes pour tous, il suffira d'en considérer un seul, et ce sera de préférence l'air, qui se trouve partout, et sur lequel il est facile d'expérimenter.

101. **De l'air.** — L'*air* est le fluide gazeux au milieu duquel nous vivons. A proprement parler ce n'est pas un gaz, mais un mélange de deux gaz, l'oxygène et l'azote. Le rapport dans lequel ils sont mélangés est, à très-peu de chose près, de 21 d'oxygène pour 79 d'azote, en volume, c'est-à-dire que dans 100 litres d'air, il entre 21 litres d'oxygène et 79 d'azote. C'est l'oxygène de l'air qui alimente toutes les combustions qui se produisent autour de nous. C'est aussi ce gaz, ainsi qu'on l'a déjà vu ci-dessus, qui entretient la vie des animaux. Or, si l'oxygène était seul dans l'air, les combustions seraient trop vives et la vie trop active ; le bois de nos foyers brûlerait presque instantément, les métaux eux-mêmes deviendraient l'élément du feu, nos chenets et toutes les garnitures métalliques de nos cheminées s'enflammeraient comme du bois. Quant à la vie, elle serait promptement consumée par l'action d'un principe trop énergique. Il fallait donc dans l'air un second gaz propre à atténuer les effets trop intenses du premier ; ce gaz est l'azote, qui formant à peu près les quatre cinquièmes de l'air, tempère suffisamment l'action de l'oxygène.

L'air est transparent, inodore, incolore, du moins sous une masse peu considérable, mais en grande masse il est bleu ; c'est lui qui donne cette couleur au ciel. Sans l'air, la voûte céleste nous paraîtrait noire, teinte qu'elle commence déjà à prendre pour les observateurs placés sur les hautes montagnes, et pour ceux qui s'élèvent en ballon, parce qu'ils n'ont plus au-dessus d'eux qu'un air raréfié.

Enfin, il a été démontré précédemment (12 et 13) que l'air et tous les gaz sont éminemment compressibles et élastiques. On verra bientôt, en traitant de l'acoustique, que c'est l'air qui, en raison de son élasticité, sert à transmettre tous les sons, depuis les plus intenses jusqu'aux plus faibles ; en sorte que sans ce fluide,

au milieu duquel nous sommes tous plongés, nous serions privés du plaisir de la musique, et que l'usage même de la parole et du chant nous serait interdit.

102. **Force expansive de l'air.** — L'air, comme tous les gaz, est doué d'une force expansive, d'une tendance à prendre toujours un volume plus grand. Pour démontrer cette propriété, on prend une vessie adaptée à un robinet de cuivre qui ferme hermétiquement (fig. 70); puis ayant mouillé la vessie pour la rendre plus flexible, on ouvre le robinet et on presse la vessie de manière à faire sortir presque tout l'air qu'elle contient. Lorsqu'il ne reste plus qu'une faible quantité d'air, on ferme le robinet, et la vessie se trouvant alors toute chiffonnée sur elle-même, on la renferme sous une cloche de verre qui repose sur le plateau d'une pompe à faire le vide (125). D'abord, l'air qui est sous la cloche, obéissant lui-même à sa force expansive, comprime la vessie et l'empêche de se gonfler; mais à mesure qu'on fait marcher la pompe et qu'on retire l'air qui est sous la cloche, on voit la vessie se gonfler comme si on soufflait dedans. Or le même phénomène se produit si, au lieu d'air, on introduit dans la vessie de l'azote, de l'hydrogène, de l'acide carbonique, en un mot, un gaz quelconque, ce qui fait voir que tous les gaz sont expansibles.



Fig. 70. — Force expansive des gaz.

103. **Poids de l'air.** — L'extrême fluidité des gaz et surtout leur expansibilité pourraient donner à penser que cette sorte de corps échappe à l'action de la pesanteur. Or, il n'en est rien; tous

les gaz ont un poids, faible il est vrai, mais facile à apprécier avec la balance ordinaire. Pour cela, on prend un ballon de verre d'une capacité de 4 à 5 litres, auquel est adapté un robinet fermant hermétiquement. Ayant vissé ce robinet sur la pompe à faire le vide, on extrait du ballon tout l'air qu'il contient; puis, le robinet étant fermé, on suspend le ballon à un plateau de balance, comme le montre la figure 71, et on en détermine le poids pendant qu'il est vide. Or, ouvrant ensuite le robinet pour laisser rentrer l'air, et pesant de nouveau le ballon plein de ce gaz, on observe une augmentation de poids notable. Si l'on a d'avance mesuré la capacité du ballon, on trouve ainsi qu'un litre d'air, à la température de la glace fondante et à la pression ordinaire de l'atmosphère, pèse $1^{gr},3$; ce qui représente un poids 770 fois moindre que celui de l'eau, à volume égal.

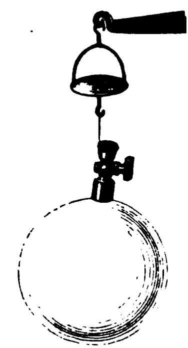


Fig. 71. — Poids de l'air.

En procédant de la même manière avec d'autres gaz, on trouve que tous sont pesants, et que le gaz le plus léger est l'hydrogène, dont un litre pèse 9 centigrammes, c'est-à-dire 14 fois et demie moins que l'air.

ATMOSPHÈRE, EXPÉRIENCES QUI PROUVENT SON POIDS.

104. **Composition de l'atmosphère.** — On donne le nom d'*atmosphère* à la couche d'air qui, pour ainsi dire, comme un vêtement léger, forme l'enveloppe du globe terrestre. L'existence de cette masse gazeuse est démontrée par les vents qui soufflent sans cesse à la surface de la terre, par le vol des oiseaux, par la suspension des nuages.

Outre l'oxygène et l'azote dont l'air se compose, l'atmosphère contient de la vapeur d'eau et du gaz acide carbonique. Le poids de la vapeur d'eau varie avec les saisons, les climats, la température, et la direction des vents. Ce poids est moyennement, à Paris, de 3 à 6 grammes par mètre cube d'air. C'est la vapeur d'eau

répandue dans l'atmosphère qui souvent en trouble la transparence. Quant à la quantité d'acide carbonique qui existe dans l'air, elle est variable, mais s'élève, en moyenne, à 1 gramme par mètre cube.

L'acide carbonique qui se rencontre dans l'atmosphère est produit principalement par la respiration des hommes et des animaux, et par la combustion des bois et des houilles consommées dans l'industrie. Cette dernière cause de production d'acide carbonique augmente rapidement d'année en année. On a calculé qu'en Europe seulement, la quantité d'acide carbonique qui se répand ainsi dans l'atmosphère est de 80 milliards de mètres cubes par an. Cette masse de gaz égale celle qui serait produite par la respiration de 509 millions d'individus, convertissant chacun, par l'acte de la respiration, 10 grammes de carbone de leur économie en acide carbonique par heure. C'est plus du double de ce que produit la population de l'Europe. Enfin, ajoutons que les volcans répandent incessamment dans l'atmosphère des quantités considérables d'acide carbonique.

Malgré les causes nombreuses de production de ce gaz, on observe que l'atmosphère en contient un volume sensiblement constant; ce qui provient de ce que les feuilles des végétaux ont la propriété de décomposer l'acide carbonique de l'air pour s'emparer du carbone qu'il contient et restituer son oxygène à l'air. De plus, l'acide carbonique de l'air se dissout dans l'eau des mers et des rivières, où il se combine aux matières terreuses pour donner naissance à des dépôts calcaires. C'est ainsi que, par une harmonie naturelle, l'atmosphère conserve une proportion à peu près constante d'acide carbonique; en sorte qu'il n'est pas à craindre que l'excès de ce gaz devienne un jour nuisible à l'espèce humaine.

La hauteur de l'atmosphère est limitée: par l'observation des crépuscules, elle a été évaluée de 60 à 70 kilomètres tout autour de la terre. Nous verrons bientôt qu'on peut aussi mesurer cette hauteur par le baromètre (119).

105. **Pression atmosphérique.** — Puisqu'on a vu ci-dessus (103) que l'air est pesant, on prévoit que la masse d'air qui compose l'atmosphère doit exercer une pression assez considérable sur la

surface de notre globe et sur tous les corps qui s'y trouvent; c'est cette pression qu'on désigne sous le nom de ***pression atmosphérique***. Elle décroît nécessairement à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère, car si l'on conçoit celle-ci partagée en tranches horizontales superposées, il est évident que les tranches inférieures, supportant le poids de toute l'atmosphère, sont les plus compri-



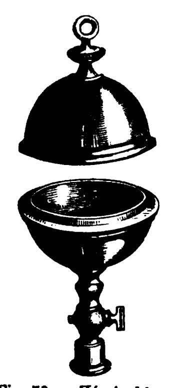
Fig. 72. — Crève-vessie.

mées et par suite les plus denses, tandis que les couches supérieures sont de moins en moins comprimées, et, par conséquent, de moins en moins denses; ce qu'on exprime en disant qu'elles sont plus ***raréfiées***, ou plus ***rares***. Lorsque nous avons dit précédemment (103) qu'un litre d'air pèse 1 gr,3, nous voulions parler d'air pris à la surface du sol; de l'air pris dans les hautes régions de l'atmosphère pèserait moins.

7.

La pression atmosphérique se démontre par plusieurs expériences, qui sont principalement celles du crève-vessie, des hémisphères de Magdebourg, et du tube de Torricelli.

106. **Crève-vessie.** — Le *crève-vessie* est un petit appareil qui sert à montrer la pression de l'atmosphère; il consiste en un manchon de verre, ouvert à ses deux bouts. L'un d'eux reste ouvert, mais on ferme l'autre hermétiquement en appliquant dessus une membrane mince et flexible, ordinairement en baudruche. Plaçant ensuite l'extrémité ouverte du manchon sur un plateau en communication avec la machine à faire le vide (fig. 72), la membrane se trouve pressée de haut en bas, à l'extérieur, par le poids de l'atmosphère, tandis qu'intérieurement elle l'est de bas en haut par la force expansive de l'air qui est dans le manchon. Ces deux pressions se faisant d'abord équilibre, la membrane ne se déprime ni dans un sens ni dans l'autre : mais à mesure que faisant fonctionner la pompe à faire le vide, on retire l'air du manchon et que, par suite, on diminue la tension intérieure, on voit la membrane se déprimer sous le poids de l'atmosphère, et bientôt elle se rompt avec une forte détonation, occasionnée par la rentrée brusque de l'air dans le manchon.


Fig. 73. — Hémisphères de Magdebourg.

107. **Hémisphères de Magdebourg.** — On démontre encore la pression atmosphérique avec les *hémisphères de Magdebourg*. Cet appareil, ainsi nommé du nom de la ville où il fut inventé, consiste en deux hémisphères de cuivre, creux, et pouvant par leurs bords s'appliquer exactement l'un sur l'autre, de manière à fermer hermétiquement (fig. 73). Ces deux hémisphères étant superposés et leur capacité étant remplie d'air, la force élastique de celui-ci fait équilibre aux pressions extérieures que l'atmosphère exerce sur chacun des hémisphères, et on peut alors les séparer sans effort. Mais si, au moyen de la machine à faire le vide, on retire l'air renfermé dans les hémisphères, la pression extérieure n'est plus équilibrée, et alors on ne peut plus les séparer sans un grand effort. En effet, deux personnes tirant dessus, comme le

montre la figure 74, n'y parviennent pas si les hémisphères sont un peu grands.

Nous verrons bientôt (109) que la pression atmosphérique, sur un centimètre carré, est de $1^{kil},033^{gr}$. Par conséquent, dans l'expérience ci-dessus, si la surface, non pas de chacun des hémisphères, mais du cercle suivant lequel ils s'appliquent l'un contre l'autre, est, par exemple, de 100 centimètres carrés, la force qui les comprime

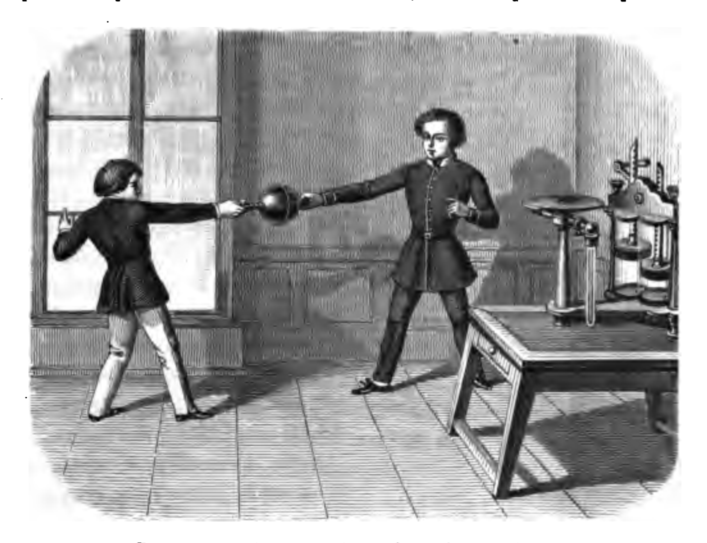


Fig. 74. — Expérience des hémisphères de Magdebourg.

sera de 100 fois $1^{k},033^{gr}$, c'est-à-dire de $103^{k},300^{gr}$. Tel sera donc aussi l'effort nécessaire pour les séparer.

C'est Otto de Guéricke, bourgmestre de Magdebourg, qui est l'inventeur de l'appareil que nous venons de décrire. Il fit construire deux hémisphères qui avaient 65 centimètres de diamètre, ce qui donnait, pour le cercle suivant lequel s'appliquaient l'un contre l'autre les deux hémisphères, une surface de 3317 centimètres carrés, et correspondait à une pression de 3426 kilogrammes. Aussi rapporte-t-on que six chevaux attelés sur les hémisphères, dans une expérience publique, ne purent parvenir à les séparer.

MESURE DE LA PRESSION ATMOSPHÉRIQUE, BAROMÈTRES.

108. **Tube de Torricelli.** — L'expérience du crève-vessie et celle des hémisphères de Magdebourg prouvent bien l'existence de la pression atmosphérique, mais elles n'en font pas connaître la valeur en kilogrammes; elles ne disent pas si cette pression est, par exemple, de 1, 2 ou 3 kilogrammes par centimètre carré. Or, l'expérience suivante, faite pour la première fois, en 1643, par Torricelli, physicien italien et élève de Galilée, montre non-seulement la pression atmosphérique, mais donne le moyen de l'évaluer en kilogrammes. Pour cela, on prend un tube de verre de 85 centimètres de longueur environ, fermé à une extrémité et ouvert à l'autre. Ce tube ayant été rempli de mercure, on en ferme l'extrémité ouverte avec le pouce, puis on le retourne et on le fait plonger dans une petite cuvette remplie de mercure (fig. 75). Si l'on retire alors le pouce, on voit le mercure s'abaisser dans le tube, mais pas complétement; il ne descend que de quelques centimètres, et la colonne qui reste dans le tube a une hauteur d'environ 76 centimètres. Or, il est évident que la partie supérieure du tube dans laquelle il n'y a pas de mercure, est aussi vide d'air; il ne s'exerce donc

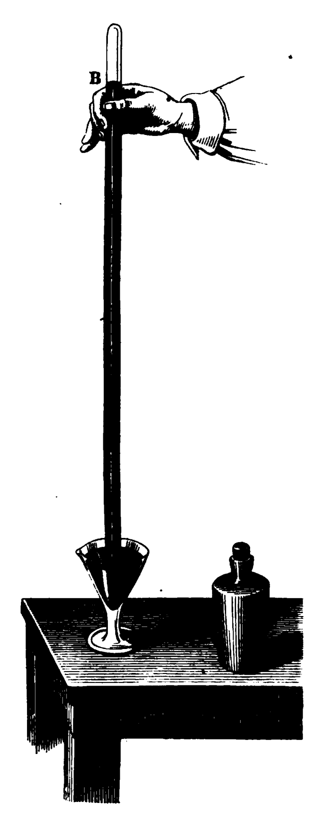


Fig. 75. — Expérience de Torricelli.

aucune pression au sommet de la colonne de mercure; par conséquent, cette colonne n'est soumise qu'à l'action de la pesanteur, et si elle ne tombe pas en vertu de son propre poids, cela ne peut être que parce que le poids de l'atmosphère qui s'exerce à l'extérieur, sur la surface du mercure contenu dans le vase A, y produit une pression précisément égale à celle de la colonne AB. Si le mercure s'est d'abord abaissé dans le tube, c'est parce que son poids l'emportait sur la pression de l'atmosphère; mais une fois que le poids de la colonne de mercure qui reste dans le tube est égal à la pression extérieure de l'atmosphère, l'équilibre s'établit. Or, comme cela arrive quand la colonne de mercure, dans le tube, a une hauteur d'environ 76 centimètres, on en conclut que la pression exercée par l'atmosphère sur une surface donnée, équivaut à la pression d'une couche de mercure de 76 centimètres de hauteur.

109. **Évaluation de la pression atmosphérique en kilogrammes.** — Une fois qu'on est arrivé à savoir qu'à la surface de la terre les corps supportent, de la part de l'atmosphère, la même pression que s'ils étaient recouverts d'une couche de mercure de 76 centimètres de hauteur, il devient facile d'évaluer cette pression en kilogrammes. En effet, si l'on considère d'abord une surface de 1 centimètre carré, cette surface supportera la pression d'une colonne de mercure qui aurait 1 centimètre carré de base et 76 centimètres de hauteur. Or, cette colonne pouvant évidemment être divisée en 76 parties égales, chacune de 1 centimètre cube, son volume sera donc de 76 centimètres cubes. Cela posé, le centimètre cube d'eau pesant 1 gramme, pour le mercure qui est 13,6 fois plus dense que l'eau, le centimètre cube doit peser $13^{gr},6$; donc la colonne de mercure qu'on vient de considérer pèse 76 fois $13^{gr},6$ ou $1^{kil},033^{gr}$. Or, puisqu'on a vu ci-dessus que la pression de l'atmosphère, sur une surface donnée, est la même que celle d'une couche de mercure de 76 centimètres de hauteur, on peut donc dire que le poids de l'atmosphère, sur 1 centimètre carré, est de $1^{kil},033^{gr}$. Sur 1 décimètre carré, qui vaut 100 centimètres carrés, cette pression est 100 fois plus grande, c'est-à-dire $103^{kil},300^{gr}$; et sur 1 mètre carré, qui vaut 100 décimètres carrés, elle est de 10330 kilogrammes.

Cette pression de $1^{kil},033^{gr}$, par chaque centimètre carré de

surface, se désigne sous le nom de ***pression d'une atmosphère;*** et on entend par pression de deux, trois, quatre atmosphères, une pression égale à 2, 3, 4 fois $1^{kil},033^{gr}$ par centimètre carré. Si l'on dit, par exemple, qu'une vapeur ou un gaz renfermé dans un vase clos est à la pression de 6 atmosphères, cela signifie que cette vapeur ou ce gaz, en vertu de sa force expansive, exerce, sur chaque centimètre carré de la paroi intérieure du vase, une pression équivalente à 6 fois $1^{kil},033^{gr}$, c'est-à-dire à $6^{kil},198^{gr}$.

110. **Expériences de Pascal.** — Aussitôt que l'expérience du tube de Torricelli fut connue en France, Blaise Pascal, voulant s'assurer que c'était bien la pression atmosphérique qui soutenait le mercure dans le tube, fit les deux expériences suivantes :

1° Voulant constater si, la pression atmosphérique diminuant, la hauteur du mercure dans le tube diminuerait aussi, ce qui serait la preuve que c'est bien la pression de l'atmosphère qui soutient cette colonne, Pascal pria un de ses parents, qui habitait l'Auvergne, de répéter sur la montagne du Puy-de-Dôme l'expérience de Torricelli. Or, le poids de l'atmosphère décroissant à mesure qu'on s'élevait, puisque l'observateur avait au-dessus de lui une masse d'air moins considérable qu'au pied de la montagne, on observa que le mercure s'abaissait d'autant plus dans le tube, que celui-ci était porté plus près du sommet de la montagne, et qu'il s'élevait de nouveau dans le tube lorsqu'on redescendait; ce qui prouva que c'est bien la pression de l'atmosphère qui fait monter le mercure dans le tube.

2° Pascal se dit encore que si c'était effectivement la pression atmosphérique qui soutenait le mercure dans le tube, et non une propriété particulière à ce liquide, on devait, en changeant de liquide, obtenir des hauteurs d'autant plus grandes que le liquide serait moins dense, ce qui était nécessaire pour que la pression, à l'intérieur du tube, fut constamment égale à la pression extérieure de l'atmosphère. En conséquence, il fit à Rouen, en 1646, cette deuxième expérience : il prit un tube semblable à celui de Torricelli, mais de 15 mètres de hauteur; puis l'ayant rempli de vin et renversé dans une cuve contenant le même liquide, Pascal observa que le vin s'abaissait d'abord dans le tube, puis s'arrêtait à une hauteur de 10 mètres et demi, c'est-à-dire à une hau-

teur environ 14 fois plus grande que celle du mercure, ce qui confirmait sa prévision, puisque le vin est à peu près 14 fois moins dense que le mercure.

BAROMÈTRES.

111. **Baromètre à cuvette.** — Le *baromètre* est un instrument qui sert à mesurer la pression atmosphérique, ainsi que l'indique son nom formé de deux mots grecs qui signifient *mesure du poids*, sous-entendu de l'air. Le tube de Torricelli décrit ci-dessus (fig. 75) est un véritable baromètre; mais pour que cet instrument pût mesurer avec précision la pression de l'atmosphère et fût portatif, il a fallu en modifier la forme, comme nous allons le faire connaître.

Observons d'abord qu'on distingue deux sortes de baromètres : le *baromètre à cuvette* et le *baromètre à siphon*. La figure 76 représente la forme qu'on donne le plus souvent au baromètre à cuvette. Il se compose d'un tube de verre *ai* de 86 centimètres de longueur environ, et de près de 1 centimètre de diamètre extérieurement. Ce tube, qui est fermé par un bout et ouvert à l'autre, est rempli de mercure et retourné ensuite de manière à plonger, par l'extrémité ouverte, dans une cuvette circulaire A, de verre et en partie pleine de mercure, mais dont la moitié antérieure seule est visible, l'autre moitié s'engageant dans une planchette d'acajou, sur laquelle est fixé tout le baromètre. La cuvette se termine en dessous par une partie sphérique, qui est remplie de mercure et dans laquelle plonge le tube *ai*. Enfin, au haut du même tube, sur sa droite, est une échelle de cuivre divisée en millimètres, et destinée à mesurer la hauteur du mercure dans le tube. Pour cela, la graduation de cette échelle part du niveau même du mercure dans la cuvette, c'est-à-dire que le zéro de l'échelle correspond à la surface du mercure dans cette cuvette. D'après cela, si le sommet de la colonne de mercure dans le tube correspond, par exemple, au nombre 760 sur l'échelle, cela indique que la colonne de mercure, depuis son sommet *a* jusqu'au niveau du mercure dans la cuvette, a une hauteur de 760 millimètres, ou 76 centimètres. On ne

trace pas toute l'échelle du haut en bas de la planchette, parce que cela est inutile, le niveau du mercure, dans le tube, ne variant que de quelques centimètres, à moins qu'on ne s'élève à une grande hauteur dans l'atmosphère; dans ce cas, la partie graduée de l'échelle doit être plus grande.



Fig. 76. — Baromètre à cuvette.

On vient de voir que le point de départ de la graduation de l'échelle barométrique est le niveau du mercure dans la cuvette; or, cela suppose que ce niveau est constant, ce qui n'est pas tout à fait exact. En effet, la pression atmosphérique variant constamment, comme nous le verrons bientôt (115), lorsqu'elle augmente, une certaine quantité de mercure passe de la cuvette dans le tube, et, par suite, le niveau s'abaisse dans la cuvette; au contraire, si la pression atmosphérique diminue, une plus ou moins grande quantité de mercure retourne du tube dans la cuvette, et le niveau remonte dans celle-ci. Le niveau du mercure variant ainsi très-fréquemment, il en résulte que rarement il se trouve correspondre au zéro de l'échelle. C'est pour corriger, en grande partie, cette cause d'erreur qu'on donne à la cuvette la forme représentée dans la figure 76. Sa partie supérieure, celle qui correspond au niveau du mercure, est très-large, d'un décimètre de diamètre environ; de

la sorte, le mercure qui passe de la cuvette dans le tube, ou de celui-ci dans celle-là, se trouvant réparti sur une grande surface, la variation de niveau est peu sensible et peut être négligée.

On construit aussi des baromètres à cuvette dans lesquels l'erreur dont nous venons de parler est corrigée en adaptant à la cuvette un fond flexible en peau de chamois. Quand le mercure, dans la cuvette, est plus bas que le zéro de l'échelle, on soulève le fond et, par suite, le mercure, à l'aide d'une vis de pression placée au-dessous de la cuvette. Si le mercure est plus haut que le zéro, on l'abaisse en tournant la vis en sens contraire; et, dans les deux cas, on parvient facilement à faire correspondre le niveau du mercure au zéro de l'échelle. Ce genre de baromètre à cuvette a reçu la dénomination de ***Baromètre de Fortin***, du nom de son inventeur.

D'après les détails dans lesquels nous venons d'entrer, il est facile de comprendre comment fonctionne le baromètre représenté dans la figure 76. Pour cela, observons qu'au point *i*, où le tube pénètre dans la cuvette, celle-ci n'est pas complétement close par le tube, en sorte que l'air pouvant circuler entre le tube et la paroi intérieure de la tubulure qui surmonte la cuvette, la pression atmosphérique se transmet librement dans celle-ci. Cela posé, la surface du mercure, dans la cuvette, supportant la pression de l'atmosphère, c'est cette pression qui soutient la colonne de mercure *ai* en dedans du tube. Vient-elle à augmenter, le mercure s'élève; diminue-t-elle, il s'abaisse. Or, comme on voit la hauteur barométrique varier ainsi non-seulement d'un jour à l'autre, mais plusieurs fois dans une même journée, c'est là un signe que la pression atmosphérique change elle-même constamment.

Pour compléter la description du baromètre à cuvette, ajoutons qu'une petite plaque *c* représentée au haut de l'instrument, entre le tube et l'échelle graduée, est mobile et peut glisser à frottement doux dans une coulisse parallèle au tube. A cette plaque, qu'on nomme le ***curseur***, est fixée une petite lame métallique horizontale qui se recourbe devant le tube sans le toucher. Amenée au niveau du mercure dans le tube, cette lame correspond, par un bout, aux divisions de l'échelle graduée, et, par l'autre, à des inscriptions gravées sur une seconde plaque, à gauche du tube, inscriptions dont

nous verrons bientôt l'usage (117). Enfin, au milieu de la planchette, des deux côtés du tube, sont deux thermomètres destinés à faire connaître la température de l'air. Un de ces thermomètres contient du mercure, l'autre de l'alcool. Un seul suffirait; ce n'est que comme ornement qu'on en pose deux sur la planchette.

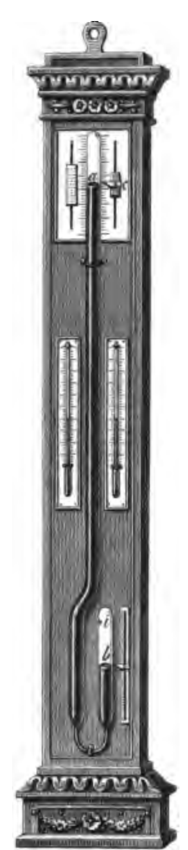


Fig. 77. — Baromètre à siphon.

112. **Baromètre à siphon.** — Le baromètre à siphon n'a pas de cuvette; il se compose simplement d'un tube de verre recourbé en deux branches inégales et contenant du mercure (fig. 77). Ces deux branches sont fermées à leurs extrémités supérieures, mais la petite est ouverte latéralement au point *i*. C'est par cette ouverture que la pression atmosphérique se transmet sur le mercure en *b*. La partie supérieure de la grande branche, au-dessus du sommet *a* de la colonne de mercure, est vide, comme dans le baromètre à cuvette. Par conséquent, il est évident que la colonne de mercure qui est dans la grande branche, de *a* en *b*, est soutenue par la pression atmosphérique qui s'exerce en *b* sur la surface du mercure; c'est donc la hauteur de la colonne *ab* qui fait connaître le poids de l'atmosphère. Pour mesurer cette hauteur on adapte, le long du tube, une échelle graduée en millimètres, de même que dans le baromètre à cuvette. Seulement ici le zéro de l'échelle n'est plus à la partie inférieure de la colonne *ab*, mais en son milieu, entre les deux thermomètres; en sorte qu'on a réellement deux échelles, l'une dont la graduation va en montant du milieu du tube vers le sommet *a*, et l'autre dont la graduation descend du milieu du tube vers la petite branche. De ces deux échelles on ne conserve que les parties extrêmes, l'une le long de la petite branche et l'autre au haut de la grande. Cela posé, pour avoir la hauteur

du mercure dans le baromètre à siphon, on fait marcher deux curseurs, analogues à celui déjà décrit dans le baromètre à cuvette, jusqu'à ce qu'ils correspondent au niveau du mercure en *a* et en *b*. Puis lisant sur les échelles les nombres qui sont en regard, on en fait la somme, et le résultat est la hauteur cherchée, en millimètres. Par exemple, si le curseur supérieur *c* correspond à 376, et le curseur inférieur à 380, la hauteur du baromètre, au moment de l'expérience, est 376 plus 380, ou 756 millimètres.

Le baromètre représenté dans la figure fig. 77 est connu sous le nom de *baromètre de Gay-Lussac*, parce que c'est ce physicien qui, le premier, a réuni entre elles la grande et la petite branches de l'instrument, à leur partie inférieure, par un tube capillaire, comme on le voit dans le dessin ci-contre. Cette modification a pour objet, lorsqu'on incline le baromètre, de s'opposer au passage de l'air de la petite branche dans la grande; condition qui est nécessaire, car si de l'air pénétrait en *a*, dans le vide barométrique, l'instrument ne donnerait plus que des indications fausses (113).

113. **Conditions pour que les indications du baromètre soient exactes.** — Pour qu'un baromètre, soit à cuvette, soit à siphon, donne des indications précises, il est nécessaire que la partie supérieure du tube, qui est vide de mercure, soit aussi vide d'air et d'humidité. En effet, s'il restait un peu d'air au haut du tube, cet air, en vertu de sa force élastique, refoulerait la colonne de mercure et l'empêcherait d'atteindre la hauteur qu'elle doit avoir pour représenter la pression de l'atmosphère. Il en serait encore de même si le haut du tube contenait de l'humidité, car celle-ci donnerait naissance à des vapeurs, et nous verrons, dans l'étude de la chaleur, que les vapeurs possèdent, comme les gaz, une force expansive plus ou moins grande. Or, sur les tubes de verre il y a toujours une couche d'air et d'humidité adhérente aux parois, tant à l'intérieur qu'à l'extérieur. Sous la pression ordinaire de l'atmosphère, cette couche abandonne difficilement le verre, mais dans le vide barométrique, où il n'y a pas de pression, elle s'en sépare, et de là résulte un mélange d'air et de vapeur qui agit, comme nous l'avons dit ci-dessus, pour abaisser la colonne de mercure.

On ne parvient point à chasser l'air et l'humidité qui adhèrent au tube en remplissant celui-ci de mercure; il faut encore faire

bouillir le mercure dans le tube même. Pour cela, on place celui-ci plein de mercure, et l'extrémité ouverte en haut, sur une grille de fil de fer inclinée, et on en approche lentement des charbons incandescents jusqu'à ce que l'ébullition se manifeste. En la prolongeant quelques minutes, l'air et l'humidité sont complétement entraînés par les vapeurs de mercure qui se dégagent.

On reconnaît si un baromètre est bien purgé d'air et d'humidité en l'inclinant doucement : le mercure se rapproche alors de l'extrémité du tube et le frappe en rendant un coup sec et métallique, quand il n'y a ni air ni humidité qui amortissent le choc ; mais le coup est sourd, s'il reste de l'air ou de l'humidité.

114. **Préférence donnée au mercure pour la construction des baromètres.** — Il est facile de se rendre compte pourquoi on se sert du mercure pour la construction des baromètres. En effet, étant plus dense que tous les autres liquides, il en faut une hauteur moindre pour faire équilibre à la pression de l'atmosphère. Par exemple, si au lieu de mercure on introduisait de l'eau dans le tube barométrique, ce dernier liquide étant à peu près 13 fois et demie moins dense que le mercure, il en faudrait une hauteur 13 fois et demie plus grande que 76 centimètres, hauteur ordinaire du mercure, c'est-à-dire environ 10 mètres. Le tube du baromètre devrait donc avoir la même hauteur, ce qui serait tout à fait impraticable. De plus, l'eau produirait dans le vide barométrique des vapeurs qui déprimeraient la colonne liquide, ce qui n'a pas lieu avec le mercure, parce que celui-ci n'émet pas de vapeur à la température ordinaire de l'atmosphère.

115. **Hauteur moyenne du baromètre.** — Lorsqu'on observe la hauteur du mercure dans le baromètre, on remarque, ainsi que nous l'avons déjà dit ci-dessus (111), que cette hauteur subit des variations continuelles, non-seulement d'un jour à l'autre, mais encore dans une même journée. Toutefois, dans nos climats, ces variations ne se produisent que dans des limites assez restreintes. A Paris, la plus grande hauteur qu'on ait observée est de 78 centimètres, la plus faible de 72 ; encore le baromètre n'atteint-il ces deux limites qu'exceptionnellement. Les variations du baromètre augmentent à mesure qu'on avance vers les pôles de la terre ; elles diminuent, au contraire, quand on se rapproche de l'équateur.

La hauteur du baromètre pouvant varier d'heure en heure, on appelle ***hauteur moyenne d'un jour***, celle qu'on obtient en faisant la somme des 24 hauteurs observées successivement d'heure en heure, pendant un jour et une nuit, et en divisant ensuite cette somme par 24. Or, on a remarqué que la hauteur moyenne de chaque jour est sensiblement celle qui a lieu à midi.

De même, on nomme ***hauteur moyenne de l'année*** celle qu'on trouve en faisant la somme des 365 hauteurs observées chaque jour à midi, pendant toute une année, et en divisant ensuite cette somme par 365. Au niveau des mers, par exemple, au Havre, à Cherbourg, à Brest, la hauteur moyenne de l'année est de 76 centimètres ; à Paris, elle est un peu moindre, ce qui s'explique parce que Paris étant plus haut que le niveau des mers de 34 mètres, la pression de l'atmosphère y est moindre.

116. **Causes des variations de la hauteur barométrique.** — Puisque la hauteur du baromètre varie constamment dans de certaines limites, il faut en conclure qu'il en est de même du poids de l'atmosphère. Lorsque la hauteur de la colonne de mercure s'élève dans le tube, ce qu'on exprime en disant que *le baromètre monte*, c'est évidemment signe que le poids de l'atmosphère augmente, et quand elle baisse, cela indique que ce poids diminue. Mais comme la masse totale d'air qui enveloppe la terre est toujours la même, ce n'est pas le poids total de l'atmosphère qui varie, c'est seulement son poids sur certaines portions de la surface du globe, en sorte que ce poids augmentant dans un lieu, il diminue dans un autre ; c'est, en effet, ce que démontre le baromètre, car lorsqu'il monte dans une contrée, on remarque qu'il descend dans quelque autre plus ou moins éloignée.

Ces variations partielles du poids de la masse de l'air sont toujours dues à des changements de température qui se produisent dans l'atmosphère ; changements qui ont pour cause l'influence des saisons, l'abondance des pluies, la direction des vents. En effet, lorsqu'une région de l'atmosphère s'échauffe plus que les régions voisines, l'air s'y dilate, devient plus léger, s'élève et se répand au loin sur les contrées environnantes. Le poids de l'atmosphère augmente donc partout où se porte l'air dilaté, et décroît, au contraire, là où il y a dilatation. Si, au contraire, l'atmosphère se

refroidit sur une certaine étendue du globe, l'air s'y condensant, une nouvelle masse d'air y afflue et le poids de l'atmosphère augmente.

117. **Relation entre la hauteur du baromètre et l'état de l'atmosphère.** — En comparant la hauteur du baromètre à l'état de l'atmosphère, on a remarqué que, dans nos climats, cette hauteur est généralement au-dessus de 76 centimètres, quand il fait beau; au-dessous de ce point, lorsqu'il pleut ou qu'il fait du vent; et, enfin, que sur un certain nombre de jours où le baromètre marque 76, il y a, en moyenne, autant de jours de beau temps que de jours de mauvais. D'après cette coïncidence entre l'état du ciel et la hauteur du baromètre, on a marqué les indications suivantes sur le baromètre :

Hauteur.	État de l'atmosphère.
731 millimètres	tempête.
740 —	grande pluie.
749 —	pluie ou vent.
758 —	variable.
767 —	beau temps.
776 —	beau fixe.
785 —	très-sec.

Dans les baromètres décrits ci-dessus (fig. 76 et 77), ce sont ces indications qui sont inscrites sur une plaque de métal placée au haut des tubes, sur leur gauche. Il suffit ainsi de voir à laquelle de ces indications correspond le mercure dans le tube, pour avoir l'état probable de l'atmosphère.

118. **Baromètre à cadran.** — Le *baromètre à cadran* est spécialement destiné à indiquer le beau et le mauvais temps. C'est un baromètre à siphon (112) dont la branche la plus courte est ouverte (fig. 79). Au-dessus est une petite poulie sur laquelle s'enroule un fil portant deux petites ampoules de verre *a* et *b*, pleines de mercure. L'ampoule *a*, pesant plus que l'autre, tend à descendre en faisant tourner la poulie de gauche à droite; c'est ce qui arrive toutes les fois que le mercure s'abaisse dans la petite branche, c'est-à-dire toutes les fois que la pression atmosphérique augmente.

Au contraire, quand la pression atmosphérique diminue, le mercure s'abaissant dans la grande branche, monte dans la petite;

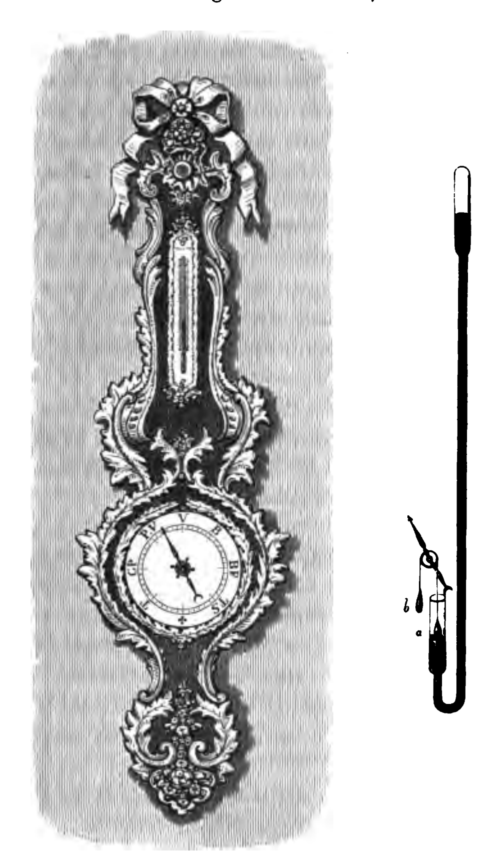


Fig. 78. Fig. 79.

Baromètre à cadran.

l'ampoule *a* est donc soulevée, et la poulie tourne de droite à gauche. Or, l'axe de la poulie porte une aiguille qui tourne avec elle sur un cadran, comme le représente la figure 78. C'est sur

ce cadran que sont inscrits par leurs initiales les mots *tempête, grande pluie, pluie ou vent*, etc.

Nous avons remarqué qu'en général on a peu de confiance dans les indications du baromètre. Cela tient à ce que la plupart de ces instruments en usage dans les maisons particulières sont défectueux. Maniés maladroitement par ceux qui les transportent, ils contiennent le plus souvent une assez grande quantité d'air dans leur partie supérieure, et alors effectivement leurs indications sont fausses. Mais lorsqu'un baromètre est bien construit, on doit avoir confiance dans ses indications. Elles sont surtout extrêmement probables quand on voit le mercure monter ou descendre lentement pendant plusieurs jours de suite. On est à peu près certain d'avoir du beau temps dans le premier cas, et du mauvais dans le second. Quant aux variations brusques, elles présagent généralement le mauvais temps et surtout les grands vents.

La coïncidence qui existe, dans nos climats, entre la hauteur du baromètre et l'état de l'atmosphère est facile à expliquer. En effet, par les vents du sud et du sud-ouest, qui sont les plus chauds, l'air qui nous arrive est dilaté; de plus, en traversant les mers, cet air s'est chargé de vapeur d'eau, qui est moins dense que lui : par ces deux raisons, l'atmosphère pèse moins, et, par suite, le baromètre descend, tandis qu'en même temps les vapeurs contenues dans l'air se condensent par le refroidissement et se résolvent en pluie. Au contraire, les vents du nord et du nord-est, qui sont les plus froids, nous apportent un air plus dense qui fait monter le baromètre; mais comme ces vents ont traversé de vastes continents, ils sont desséchés et accompagnés, en général, d'un ciel pur et serein.

119. **Mesure de la hauteur des montagnes par le baromètre.** — L'usage le plus important qu'on ait fait du baromètre est de l'appliquer à mesurer la hauteur des montagnes au-dessus du niveau des mers. En effet, si l'on conçoit l'atmosphère partagée en couches horizontales d'égale épaisseur, en cent couches, par exemple, un baromètre placé au niveau des mers, au Havre, je suppose, supportera le poids de ces cent couches, et nous avons vu (115) que pour faire équilibre à ce poids, il atteindra moyennement la hauteur de 76 centimètres. Mais si on élève ce baromètre dans

l'atmosphère jusqu'au-dessus de la dixième couche, il ne supportera plus que le poids des 90 couches qui sont au-dessus de lui, poids nécessairement moindre que celui qu'il supportait d'abord. Le mercure devra donc s'abaisser dans le baromètre. Il baissera encore si on le conçoit porté au-dessus de la vingtième couche; et ainsi de suite jusqu'à la limite de l'atmosphère, s'il était possible d'y porter le baromètre. Là, il ne supporterait plus aucune pression, et le niveau serait le même dans le tube que dans la cuvette.

Puisque le baromètre baisse à mesure qu'on s'élève, on peut, de la quantité dont il s'abaisse, déduire la hauteur à laquelle on est au-dessus du niveau des mers. Si l'air avait toujours la même densité jusqu'à la dernière limite de l'atmosphère, un calcul bien simple ferait connaître cette hauteur; car l'air étant à peu près dix mille fois moins pesant que le mercure, si on trouvait que le baromètre s'est abaissé d'un centimètre, on en conclurait que la colonne d'air qui fait équilibre au mercure dans le tube, a diminué dix mille fois plus ou d'environ 100 mètres : telle serait donc la hauteur à laquelle on se trouverait. Mais la densité de l'air décroissant nécessairement à mesure qu'on s'élève, puisque les couches d'air supportent un poids de moins en moins considérable, la mesure des hauteurs par le baromètre n'est pas aussi simple que nous venons de le supposer; aussi n'est-ce que par le calcul que la hauteur de la colonne de mercure dans le baromètre peut conduire à la mesure des hauteurs des montagnes.

La hauteur moyenne du baromètre qui, au niveau des mers est de $0^m,763$, n'est plus à Paris que de $0^m,756$; d'où l'on conclut, par le calcul, que le sol de Paris est élevé de 34 mètres au-dessus de la surface de la mer.

120. **Hauteur de l'atmosphère.** — L'air pris à la surface de la terre, pesant à peu près 10400 fois moins que le mercure, il s'ensuit que s'il conservait toujours la même densité jusqu'à la limite de l'atmosphère, il en faudrait, pour faire contre-poids à la colonne de mercure du baromètre, une hauteur égale à 10400 fois 76 centimètres, ou près de 8000 mètres. Mais comme la densité de l'air décroît rapidement à mesure qu'on s'élève, la colonne barométrique ne peut être maintenue en équilibre que par une hauteur

d'atmosphère beaucoup plus considérable. Or, en ayant égard, d'un côté, au décroissement de densité de l'air dans les hautes régions de l'atmosphère, de l'autre, à sa condensation toujours croissante par le refroidissement à mesure qu'on s'élève, on a trouvé par le calcul que la hauteur de l'atmosphère est d'environ 60 kilomètres.

EFFETS PRODUITS PAR LA PRESSION ATMOSPHÉRIQUE.

121. La pression atmosphérique se transmet en tous sens. — Il ne faudrait pas croire que la pression de l'atmosphère ne s'exerce, comme la pesanteur, que de haut en bas. En effet, les gaz, de même

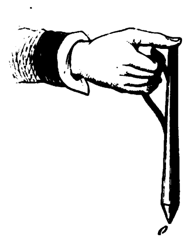


Fig. 81. — Tâte-vin.



Fig. 80. — Effet de la pression atmosphérique.

que les liquides (69), ont la propriété de transmettre les pressions en tous sens; d'où il résulte que le poids de l'atmosphère se fait sentir non-seulement de haut en bas, mais latéralement et même de bas en haut. Un grand nombre d'expériences le démontrent: par exemple, dans celle des hémisphères de Magdebourg (107), qu'on les tire dans le sens horizontal, comme le montre la figure 74, ou bien dans le sens vertical, on trouve, dans les deux cas, qu'il faut le même effort pour les séparer.

On peut encore vérifier que la pression atmosphérique s'exerce de bas en haut par l'expérience suivante: on remplit d'eau un verre à boire ordinaire, on le recouvre d'une feuille de papier qu'on maintient avec la paume de la main, tandis que de l'autre main on retourne le verre; retirant alors la main qui soutenait le papier,

on voit le verre rester plein, l'eau et le papier étant soutenus par la pression qui s'exerce de bas en haut (fig. 80). Sans la présence de la feuille de papier, l'eau qui est dans le verre se diviserait pour laisser rentrer l'air et l'expérience ne pourrait réussir.

L'usage du ***tâte-liqueur***, dont se servent les marchands de vin pour goûter les vins, est aussi fondé sur l'effet de la pression atmosphérique. C'est un tube de fer-blanc (fig. 81), terminé à la partie inférieure par un petit cône dont le bout *o* est ouvert; à l'autre extrémité est une petite ouverture qui se ferme avec le pouce. Les deux bouts étant ouverts, on plonge le tube dans une barrique pleine de vin, où il se remplit par l'ouverture inférieure. Si, fermant alors le bout supérieur avec le pouce, comme le montre la figure ci-contre, on retire le tube, celui-ci reste plein par l'effet de la pression qui s'exerce en *o*. Mais si, plaçant le tube au-dessus d'un verre, on retire le pouce, aussitôt la pression atmosphérique s'exerçant par le haut aussi bien que par le bas, le liquide s'écoule et est recueilli dans le verre.

122. **Pression supportée par le corps humain.** — D'après la pression que l'atmosphère exerce sur 1 centimètre carré, pression qu'on a vue être égale à 1 kilogramme et 33 grammes (109), on prévoit que la somme totale des pressions que supporte notre corps doit être considérable; c'est en effet ce qui a lieu. Pour calculer cette pression, il suffit de savoir que chez un homme de grandeur et de grosseur moyennes, la surface entière du corps est environ d'un mètre carré et demi, c'est-à-dire de 15000 centimètres carrés. La pression supportée par le corps humain est donc de 15000 fois $1^{kil},033^{gr}$, ou environ 15500 kilogrammes.

Mais, dira-t-on, comment se fait-il que nous ne sentions rien de cette énorme pression? Comment n'en sommes-nous pas écrasés? Pour nous rendre compte de quelle manière nous résistons à ces pressions, remarquons d'abord que d'après ce qui a été démontré dans le paragraphe précédent, la pression de l'atmosphère se transmettant également dans tous les sens, elle agit sur nous par le haut, par le bas, par les côtés, et se fait ainsi contre-poids à elle-même. En un mot, nous sommes dans l'air comme un plongeur dans l'eau, poussés d'un côté, mais soutenus par la pression qui nous pousse de l'autre. Cela explique comment nous ne sentons

pas ces pressions sur un point de notre corps plus que sur un autre, et comment, vivant au milieu d'elles, nous y sommes insensibles. Mais cela ne dit pas pourquoi nous ne sommes pas aplatis par ces pressions entre lesquelles nous sommes pris comme entre les mâchoires d'un étau. Or, si nous leur résistons, c'est par l'effet d'une force intérieure qui leur fait constamment équilibre, et cette force, c'est l'élasticité d'une certaine masse de gaz qui se trouve dans le sang, dans le tissu des chairs, en un mot dans tous nos organes. Ces gaz, il est vrai, sont comprimés par le poids de l'atmosphère, mais ils lui résistent par leur élasticité, en sorte que notre corps est ici tout à fait comparable à un bocal plein d'air. Les parois de celui-ci sont pressées de dehors en dedans par le poids de l'atmosphère, mais quelque minces qu'elles soient, elles résistent, parce que l'air qui remplit le bocal les presse de dedans en dehors, en vertu de son élasticité, avec une force précisément égale à celle qui les presse extérieurement.



Fig. 82. — Effet de la pression atmosphérique sur le corps humain.

Pour démontrer qu'il y a des gaz dans les tissus de nos chairs et que ces gaz sont comprimés par le poids de l'atmosphère, on fait l'expérience suivante : on a un gros tube de verre, ouvert à ses deux bouts, et à bords épais pour ne pas blesser l'expérimentateur. Ayant placé ce tube sur la machine à faire le vide, on en ferme l'extrémité supérieure avec la paume de la main, comme le montre la figure 82. L'air qui se trouve renfermé sous la main fait d'abord équilibre à la pression extérieure de l'atmosphère, et on

ne ressent sur la main aucune pression. Mais si une autre personne retire l'air qui est dans le tube, en faisant fonctionner la machine, on ressent une forte pression sur la main, et ce n'est qu'avec peine qu'on peut la retirer. En outre, la force élastique des gaz renfermés dans les tissus n'étant plus contre-balancée par la pression de l'air, la paume de la main se gonfle fortement et le sang tend à s'échapper par les pores.

D'après l'expérience qu'on vient de citer, il semblerait que lorsqu'on pose la main sur un corps, on ne devrait plus pouvoir la relever à cause de la pression qu'elle supporte; mais ici le vide n'existe pas sous la main; entre elle et le corps sur lequel elle est appliquée, est interposée une couche d'air très-mince qui fait équilibre, par sa force élastique, à la pression atmosphérique, ce qui fait qu'on ne ressent aucune résistance lorsqu'on relève la main.

Les ventouses employées en médecine sont une application de l'effet de la pression atmosphérique sur le corps humain, et de l'élasticité des gaz renfermés dans les tissus de nos chairs, gaz qui sont l'acide carbonique, l'oxygène et quelques traces d'azote.

CHAPITRE II

MESURE DE LA FORCE ÉLASTIQUE DES GAZ.

123. **Loi de Mariotte sur la compressibilité des gaz.** — On a déjà vu que le caractère distinctif de l'air et de tous les gaz est leur grande compressibilité et leur parfaite élasticité (12 et 13). Il nous reste à faire connaître la loi qui régit la compressibilité des gaz, c'est-à-dire dans quel rapport augmente ou diminue le volume d'un gaz, à mesure qu'on fait varier la pression qu'il supporte.

Or, l'abbé Mariotte, physicien français, mort à Paris en 1684, a le premier trouvé cette loi que ***les volumes des gaz sont en raison inverse des pressions qu'ils supportent***; c'est-à-dire que la pression supportée par une masse gazeuse devenant deux, trois fois plus grande, le volume devient deux, trois fois plus petit; et, qu'au

contraire, la pression devenant deux, trois fois moindre, le gaz, en vertu de sa force expansive, prend un volume double, triple de

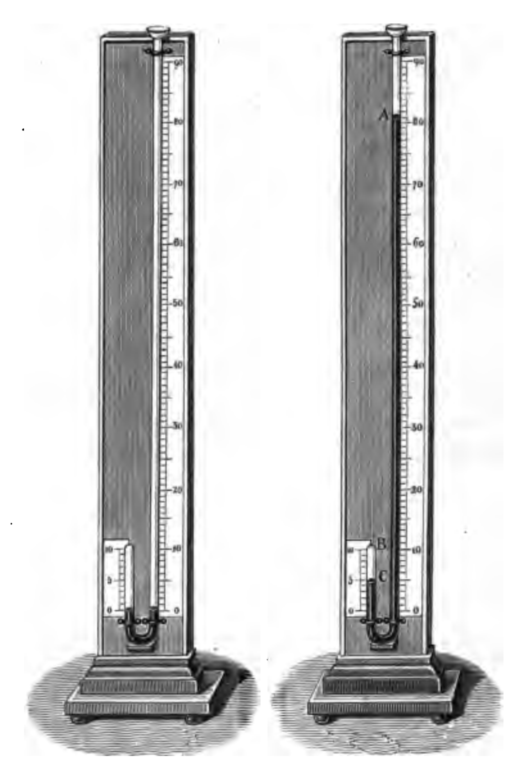


Fig. 83. Fig. 84.
Tube de Mariotte pour démontrer la loi de la compressibilité des gaz.

celui qu'il avait d'abord. C'est ce principe qu'on désigne sous le nom de ***loi de Mariotte.***

Pour démontrer cette loi, Mariotte a fait usage d'un appareil connu sous le nom de ***tube de Mariotte,*** et qui consiste en un tube de verre recourbé en deux branches inégales (fig. 83 et 84). A l'inverse du baromètre à siphon, c'est la petite branche qui est fermée

et la grande qui est ouverte. Le long de la grande branche est une échelle graduée en centimètres, et destinée à mesurer la hauteur du mercure qu'on verse dans cette branche. Le long de la petite branche, à gauche, est aussi une échelle, laquelle sert à indiquer des capacités égales dans cette branche, au nombre de dix. Enfin, on a soin que les zéros des deux échelles se correspondent. Cela posé, on commence par verser un peu de mercure dans le tube, par le haut de la grande branche, de manière que le niveau soit le même des deux côtés et corresponde de part et d'autre au zéro de chaque échelle (fig. 83). En cet état, la petite masse d'air renfermée dans la courte branche reçoit, par l'intermédiaire du mercure, la pression de l'atmosphère qui s'exerce dans le grand tube; et puisque le niveau est le même des deux côtés, cette petite masse d'air est exactement à la pression d'une atmosphère. Mais si l'on verse peu à peu du mercure dans la grande branche, l'air est de plus en plus comprimé et son volume va toujours en décroissant. Or, si on continue ainsi jusqu'à ce que le volume d'air soit réduit de moitié, comme le montre la figure 84, et qu'on mesure alors la colonne de mercure de la grande branche, depuis le niveau C jusqu'au sommet A, on trouve qu'elle a précisément la même hauteur qu'a le baromètre au moment de l'expérience. La pression que cette colonne de mercure AC exerce sur l'air renfermé dans la petite branche équivaut donc à une atmosphère; et comme cette colonne supporte elle-même, en A, le poids de l'atmosphère, il s'ensuit qu'au moment où le volume BC est réduit de moitié, la pression qu'il supporte est de deux atmosphères, c'est-à-dire double de la pression qu'il supportait d'abord; on trouve de même que pour une pression de trois atmosphères, le volume devient trois fois moindre, et ainsi de suite, ce qui démontre la loi de Mariotte.

Il est à remarquer que lorsqu'un gaz se comprime ainsi, suivant la loi de Mariotte, sa densité augmente comme la pression, c'est-à-dire que lorsque celle-ci est doublée ou triplée, il en est de même de la densité du gaz, ce qui découle de la réduction de volume qu'il a subie.

Remarquons encore que lorsque l'on comprime un gaz, sa force élastique étant nécessairement égale à la pression qu'il supporte, il en résulte que cette force élastique, cette tension, est elle-même

en raison inverse du volume qu'a pris le gaz; c'est-à-dire que si son volume est devenu deux, trois fois moindre, sa tension, au contraire, est devenue deux, trois fois plus grande. Par exemple, dans les soufflets dont on se sert pour activer la combustion, c'est parce que la capacité du soufflet est réduite par le rapprochement des deux plateaux de bois, que l'air acquiert une tension qui lui permet de vaincre la pression atmosphérique pour s'échapper en courant rapide par la buse.

124. **Manomètres.** — On nomme *manomètres* des instruments qui servent à mesurer la force élastique des gaz et des vapeurs. Leur nom est formé de deux mots grecs qui signifient *mesure des gaz*. On en distingue deux sortes : le manomètre à air libre et le manomètre à air comprimé.

Manomètre à air libre. — La figure 85 représente un manomètre à air libre, fixé sur une planchette de bois contre un mur, et en communication avec une chaudière à vapeur. Il se compose d'un tube de verre B, de 6 mètres de longueur environ, ouvert à son extrémité supérieure, et soudé, à l'autre bout, à une cuvette C contenant du mercure. De cette cuvette part un long tube qui se rend à une chaudière A.

Cela posé, lorsque la tension de la vapeur, dans la chaudière, est égale à la pression atmosphérique, cette tension fait équilibre au poids de l'atmosphère qui se transmet par le haut du tube B, et le niveau du mercure est alors le même dans le tube et dans la cuvette. On inscrit donc le nombre 1 sur la planchette, en regard de ce niveau. Puis, comme une colonne de mercure de 76 centimètres représente une pression égale à celle d'une atmosphère (109), à 76 centimètres plus haut, à partir de 1, on marque 2 ; montant encore de 76 centimètres, on marque 3 ; et ainsi de suite, de 76 en 76 centimètres, chaque intervalle valant une atmosphère. D'après ce mode de graduation, si la vapeur, en comprimant le mercure de la cuvette, le refoule dans le tube, par exemple, à $3\frac{1}{2}$, comme le représente le dessin, cela indiquera que la tension de la vapeur, dans la chaudière, est de trois atmosphères et demie ; c'est-à-dire que sur chaque centimètre carré de la paroi intérieure de la chaudière, la pression est de trois fois et demie $1^{kil},033^{gr}$.

Manomètre à air comprimé. — Cet instrument, fondé sur la

loi de Mariotte, se compose d'un tube de verre de 50 à 80 centimètres de longueur environ (fig. 86). Son extrémité supérieure est fermée, et son extrémité inférieure est en communication avec



Fig. 85. — Manomètre à air libre.

une cuvette *c* contenant du mercure. Cette cuvette, tout à fait semblable à celle du manomètre à air libre, communique, elle aussi, par un long tube, avec le vase dans lequel se trouve le gaz ou la vapeur dont on veut mesurer la force élastique.

Cela posé, le tube *ab* contient de l'air en quantité telle que le

niveau du mercure est exactement le même, dans ce tube et dans la cuvette, quand dans celle-ci le mercure supporte une pression d'une atmosphère; mais, pour une pression plus grande, le mercure est refoulé de la cuvette jusqu'en *b*, par exemple, et le volume d'air, qui était d'abord égal à tout le volume intérieur du tube, n'occupe plus que sa partie supérieure *ab*. Pour avoir la pression qui s'exerce alors en *c*, il faut, à la colonne de mercure qui s'élève dans le tube, au-dessus du niveau de la cuvette, ajouter la tension de l'air renfermé en *ab*, tension qui se calcule d'après la loi de Mariotte, en tenant compte de la réduction de volume que l'air du manomètre a subie. Une échelle placée le long du tube indique, en atmosphères, la somme des pressions dues au poids de la colonne de mercure soulevée et à la tension de l'air en *ab*, et, par suite, fait connaître la pression qui s'exerce sur le mercure de la cuvette.

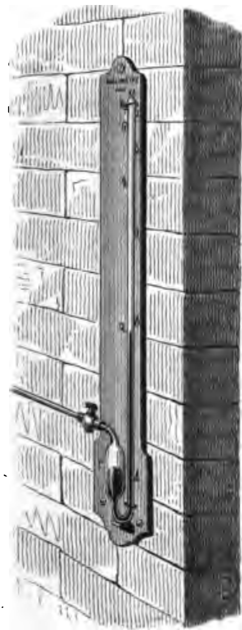


Fig. 86. — Manomètre à air comprimé.

CHAPITRE III

APPAREILS FONDÉS SUR LES PROPRIÉTÉS DE L'AIR ET SUR LA PRESSION ATMOSPHÉRIQUE.

125. **Machine pneumatique.** — La *machine pneumatique*, ainsi nommée d'un mot grec qui signifie *air*, est un appareil qui sert à extraire d'un vase clos l'air qu'il contient, ainsi qu'on l'a déjà vu dans de nombreuses expériences. Cette machine fut inven-

tée par Otto de Guéricke, en 1650, peu d'années après que Torricelli eut fait le vide dans un tube (108). La figure 87 donne une vue perspective de la machine pneumatique ; la figure 88 en montre



Fig. 87. — Machine pneumatique.

les détails intérieurs dans le sens de la longueur, et la figure 89 dans le sens transversal.

Cette machine se compose de deux corps de pompe en cristal dans lesquels peuvent monter et descendre deux pistons P et Q,

en cuir imbibé d'huile, et s'appliquant exactement contre les parois des corps de pompe, de manière à les fermer hermétiquement. Ces pistons sont fixés à deux tiges dentées A et B, qui engrènent dans les dents d'un petit pignon K (fig. 89); on fait tourner celui-ci alternativement de gauche à droite et de droite à gauche, à l'aide

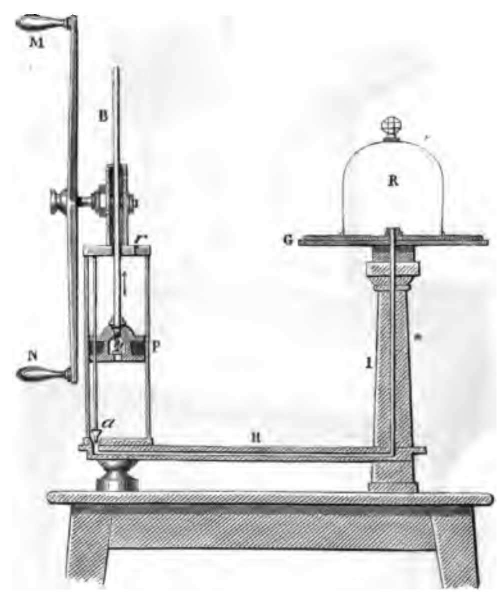


Fig. 88. — Coupe longitudinale de la machine pneumatique.

d'une manivelle MN, d'où il résulte que lorsqu'un piston monte l'autre descend.

Les deux corps de pompe reposent sur une plate-forme de cuivre H, à laquelle ils sont solidement mastiqués; cette même plate-forme porte encore une colonne I surmontée d'un plateau G. Sur ce plateau est une cloche de verre R qu'on nomme le *récipient* ; c'est dans ce récipient qu'on fait le vide. Pour cela, dans l'intérieur de la colonne est un conduit qui se prolonge, au-dessous de la plate-forme H, jusque entre les deux corps de pompe

(fig. 88 et 89); là, il se bifurque en forme de T, pour aboutir à deux ouvertures *a* et *b* pratiquées dans le fond des cylindres. Ces ouvertures, qui sont coniques, sont fermées par deux petites soupapes en forme de cônes renversés; ces soupapes sont fixées à des tiges de fer qui traversent les pistons, et peuvent glisser à frottement doux de haut en bas et de bas en haut. Enfin, les pistons P et Q ne sont pas pleins : dans leur intérieur est réservée une cavité cylindrique communiquant avec la partie inférieure des corps de pompe par deux ouvertures circulaires *s* et *t* (fig. 89). Ces ouvertures sont fermées par de petites soupapes à clapet, maintenues par de faibles ressorts, qui s'enroulent autour d'une tige fixée aux soupapes mêmes. Il est à remarquer que les quatre soupapes *a*, *b*, *s* et *t* ouvrent de bas en haut.

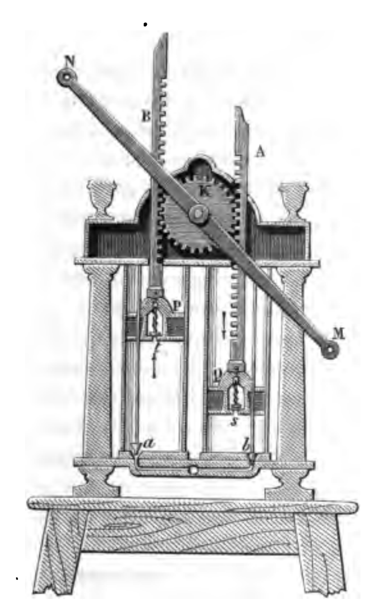


Fig. 89. — Coupe transversale de la machine pneumatique.

Ces détails connus, il est facile de se rendre compte du jeu de la machine. Pour cela, il suffit de considérer ce qui se passe dans un seul corps de pompe; soit celui représenté en coupe dans la figure 88. Le piston P étant d'abord au bas de sa course, aussitôt qu'il monte, il soulève la tige qui le traverse et, avec elle, la soupape *a*, qui reste ouverte pendant toute l'ascension. Quant à la soupape *t*, qui est dans le piston, elle reste fermée par l'effet de la pression atmosphérique qui se transmet dans le corps de pompe par une ouverture *r* pratiquée dans le couvercle qui le recouvre. D'après cette position des deux soupapes, à mesure que le piston monte, l'air extérieur de l'atmosphère ne peut pénétrer dans la

partie inférieure du corps de pompe, mais l'air du récipient R y pénètre en partie, en vertu de son élasticité, par le conduit intérieur qui descend dans la colonne I et passe dans la plate-forme H; en sorte que quand le piston est arrivé au haut de sa course, une portion de l'air du récipient a passé dans le corps de pompe. Il y a bien toujours dans le récipient le même volume d'air, mais cet air est plus raréfié, il est moins dense.

Cela posé, voyons, lorsque le piston redescend, ce que devient l'air qui a passé dans le corps de pompe. La tige qui porte la soupape *a* s'abaissant alors avec le piston, cette soupape se ferme, et l'air qui remplit la partie inférieure du corps de pompe ne peut retourner dans la cloche. Or, cet air se trouvant de plus en plus comprimé, à mesure que le piston s'abaisse, sa tension croît ellemême de plus en plus et finit par l'emporter sur la pression atmosphérique. La soupape *t* se trouvant alors pressée de bas en haut par l'air comprimé plus qu'elle ne l'est de haut en bas par le poids de l'atmosphère, elle est soulevée et laisse l'air qui remplit la partie inférieure du corps de pompe passer dans sa partie supérieure et de là dans l'atmosphère par l'ouverture *r*. Voici donc une certaine quantité d'air complétement expulsée. Une nouvelle quantité sera extraite à un second coup de piston, une autre à un troisième, et ainsi de suite. L'air se raréfie donc de plus en plus dans le récipient; toutefois, on ne parvient jamais à en extraire entièrement l'air qu'il renferme, car il vient un moment où celui qui reste dans le récipient et dans le corps de pompe est tellement raréfié, que lorsque le piston P revient au bas de sa course, le gaz comprimé qui se trouve au-dessous n'acquiert plus une tension suffisante pour vaincre la résistance de l'atmosphère et pour faire ouvrir la soupape *t*. On est alors arrivé à la dernière limite de la raréfaction qu'on puisse donner à l'air dans le récipient, et il est inutile de faire jouer la machine plus longtemps.

Tout ce qui vient d'être dit d'un des corps de pompe s'applique à l'autre. La machine pourrait même fonctionner avec un seul; c'est, en effet, ainsi qu'elle a d'abord été construite; mais en faisant usage de deux corps de pompe, on fait le vide plus rapidement, et de plus, la pression atmosphérique se faisant équilibre sur les deux pistons, on éprouve moins de résistance à les

mouvoir. C'est Hawksebee, physicien anglais, qui, le premier, adopta deux corps de pompe.

126. **Mesure du degré de raréfaction de l'air dans le récipient.** — Comme on n'obtient jamais le vide parfait dans le récipient de la machine pneumatique, mais que l'air n'y est que plus ou moins raréfié, il importe de reconnaître à quel degré de raréfaction le gaz est arrivé après qu'on a pompé un certain temps. Pour cela, on adapte à la colonne qui porte le récipient, une cloche de cristal E (fig. 87), communiquant, à sa partie supérieure, avec le conduit pratiqué suivant l'axe de la colonne I. Dans cette cloche est un tube de verre recourbé en deux branches égales, lequel se désigne sous le nom d'*éprouvette* ou de *baromètre tronqué*, parce que c'est, en effet, un véritable baromètre à siphon, qui, au lieu d'avoir 80 centimètres de hauteur, n'en a que 20 environ. La branche qui occupe la gauche du dessin est fermée, l'autre est ouverte. Enfin, le tube est fixé à une plaque métallique sur laquelle est une échelle graduée en millimètres; le zéro de l'échelle étant au milieu des deux branches, il en part une double graduation, l'une ascendante, l'autre descendante, comme dans le baromètre de Gay-Lussac.

Cela posé, la branche fermée étant remplie de mercure, tant que l'air contenu dans le récipient R et dans la cloche E a une tension suffisante, il soutient le mercure dans cette branche; mais lorsqu'on a donné un certain nombre de coups de piston, l'air se raréfie et ne fait plus équilibre, par sa force élastique, à la colonne de mercure dans la branche fermée; celui-ci descend donc dans cette branche et monte dans l'autre. Plus on fait marcher la machine, plus la différence de niveau dans les deux branches est faible; mais jamais on n'arrive à avoir exactement le même niveau des deux côtés; le mercure est toujours plus haut, d'un à deux millimètres, dans la branche fermée que dans la branche ouverte, ce qu'on exprime en disant qu'*on a fait le vide à un ou à deux millimètres*.

127. **Expériences diverses avec la machine pneumatique.** — Nous avons déjà décrit de nombreuses expériences faites avec la machine pneumatique : telles sont celles de la pluie de mercure (fig. 1), de la chute des corps dans le vide (fig. 32), de la vessie

dans le vide (fig. 70), du crève-vessie (fig. 72), et enfin, des hémisphères de Magdebourg (fig. 74).

La machine pneumatique sert encore à démontrer que l'air, par l'oxygène qu'il contient, est nécessaire à l'entretien de la combustion et de la vie. En effet, si l'on place sous le récipient une bougie allumée, on voit la flamme perdre de son intensité à mesure qu'on fait le vide, et s'éteindre bientôt tout à fait. De même, si l'on met un animal, un oiseau, par exemple, sous le récipient, il tombe asphyxié aussitôt qu'on fait le vide (fig. 90). Les mammifères et les oiseaux perissent dès qu'ils sont dans le vide; les poissons et les reptiles supportent plus longtemps la privation de l'air. Quant aux insectes, ils vivent encore après avoir séjourné plusieurs jours dans le vide.



Fig. 90. — Asphyxie dans le vide.

128. Application du vide à la conservation des substances alimentaires. — On a fait une application importante du vide à la conservation des substances alimentaires. Dans l'air, sous l'influence de la chaleur, de l'humidité et de l'oxygène, ces substances fermentent et se putréfient rapidement; mais si on leur enlève le contact de l'oxygène, soit en faisant le vide, soit autrement, elles se conservent fraîches pendant un grand nombre d'années.

C'est Appert, confiseur à Paris, qui le premier, en 1809, fit connaître le moyen de conserver les substances alimentaires dans le vide, ou, plus rigoureusement, dans un espace ne contenant pas d'oxygène, ce qui revient au même. Son procédé consiste à renfermer les substances à conserver dans un flacon de verre bien bouché et rempli le plus complétement possible; puis à placer ce flacon dans un bain d'eau qu'on chauffe et qu'on maintient à l'ébul-

lition pendant quelque temps. Sous l'influence de la chaleur, le peu d'oxygène qui restait dans le flacon est absorbé par les substances organiques que celui-ci contient, en sorte qu'il ne reste plus, à l'état libre, que de l'azote, gaz impropre à développer la fermentation. Aussi, des produits ainsi préparés se sont-ils conservés jusqu'à vingt années sans altération. Généralement aujourd'hui, au lieu de flacons de verre, on fait usage de boîtes de fer-blanc.

En Angleterre, le procédé d'Appert a été modifié de la manière suivante : au lieu de faire bouillir les substances alimentaires dans des boîtes de fer-blanc hermétiquement closes, on réserve dans le couvercle de celles-ci un petit trou destiné à laisser dégager les vapeurs produites pendant l'ébullition, et, en même temps, l'air qui restait dans les boîtes, lequel est entraîné avec les vapeurs. Lorsqu'on juge que tout l'air est ainsi expulsé, on laisse tomber, sur le petit trou du couvercle, une goutte de plomb fondu qui le ferme complétement. Ce procédé est pratiqué en grand par les Anglais pour fournir leurs flottes de viandes et de légumes frais, qui contribuent puissamment à entretenir la santé des équipages.

129. **Machine de compression.** — La *machine de compression* est un appareil qui sert à comprimer l'air. Représentée dans la figure 91, elle a beaucoup de rapport avec la machine pneumatique. Comme celle-ci, elle est composée de deux corps de pompe et d'un récipient. Les corps de pompe sont en cuivre, ou en verre épais, afin d'être plus résistants; et le récipient consiste en un cylindre de cristal à parois épaisses, fermé à ses deux bouts par deux plateaux de cuivre, qu'on serre fortement contre les bords du cylindre au moyen de quatre colonnes de cuivre à vis de pression. En cas de rupture du cylindre par l'effet de la pression intérieure, on l'enveloppe d'un grillage de fil de fer destiné à arrêter les éclats de verre qui seraient projetés au loin. Enfin, entre les corps de pompe et le récipient est un petit manomètre à air comprimé (124), consistant en un réservoir cylindrique *m* qui contient du mercure dans lequel plonge un tube de verre plein d'air.

Pour se rendre compte du jeu de la machine, il nous reste à ajouter que dans l'intérieur des pistons et au bas des corps de pompe sont quatre soupapes tout à fait semblables à celles de la machine

pneumatique, mais ouvrant en sens contraire, c'est-à-dire de haut en bas. Cela posé, lorsque les pistons descendent, leurs soupapes se ferment, tandis que celles qui sont en bas des corps de pompe s'ouvrent, d'où il résulte que l'air contenu dans ceux-ci est refoulé dans le récipient. Au contraire, lorsque les pistons remontent, les



Fig. 91. — Machine de compression.

soupapes placées à la base des corps de pompe se ferment, et l'air du récipient ne peut revenir dans ces derniers; mais comme, en même temps, les soupapes des pistons s'ouvrent par l'effet de la pression atmosphérique qui pèse dessus, une nouvelle quantité d'air pénètre dans la partie inférieure des corps de pompe, laquelle masse d'air, au coup de piston suivant, sera refoulée dans le récipient, et ainsi de suite. En sorte que la masse de l'air et, par suite, la tension vont toujours en croissant dans le récipient. Cette tension se mesure en atmosphères à l'aide du manomètre dont le pied communique avec le conduit qui va des corps de pompe au récipient.

L'air comprimé présente les phénomènes suivants : une bougie y brûle plus activement que dans l'air ; ce qui s'explique en observant qu'à volume égal la quantité d'oxygène est plus grande. Les animaux placés dans l'air comprimé ne paraissent pas y éprouver la moindre gêne. Pour l'exécution de travaux entrepris sous la Loire, il y a quelques années, des ouvriers ont été soumis, à l'intérieur d'appareils à air comprimé, à une pression de 3 atmosphères sans en ressentir aucun embarras qu'un bourdonnement intense dans les oreilles, mais qui n'avait lieu qu'au moment où l'excès de pression commençait ou cessait, et qui disparaissait aussitôt que l'équilibre était établi entre la tension de l'air contenu dans l'organe de l'ouïe et la tension de l'air extérieur.

130. **Fontaine de Héron.** — La *fontaine de Héron* est un appareil à l'aide duquel on peut obtenir artificiellement un jet d'eau continu pendant plusieurs heures. Inventée par Héron, né à Alexandrie, 120 avant J.-C., cette fontaine se compose de deux globes de verre réunis par deux tubes de cuivre, et surmontés d'une cuvette de même métal (fig. 92). Au fond de celle-ci est un trou dans lequel passe un tube court, placé entre les deux premiers et destiné à donner écoulement au jet. On commence par retirer ce petit tube, puis par l'orifice qu'il laisse ouvert, on remplit d'eau le globe supérieur. Cela fait, on remet le petit tube en place et on verse de l'eau dans la cuvette. Or, le long tube figuré sur la gauche du dessin, allant de la cuvette jusqu'au bas du globe inférieur, le liquide descend dans ce dernier, et en chasse l'air qui s'y trouve, en le refoulant, par le tube de droite, dans le globe supérieur. La tension de l'air, dans celui-ci, se trouvant alors augmentée de tout le poids de la colonne d'eau qui descend de la cuvette au globe inférieur, le liquide jaillit avec force par le tube du milieu, comme le montre le dessin. D'ailleurs, l'eau qui jaillit ainsi retombant dans la cuvette, celle-ci se remplit d'une manière continue à mesure que l'eau qu'elle contient se rend dans le globe inférieur; d'où il résulte que le jet persiste jusqu'à ce que le globe supérieur soit vide.

131. **Fontaine intermittente.** — La *fontaine intermittente* est un petit appareil à écoulement discontinu qui sert à démontrer, dans les cours de physique, les effets de la pression atmosphérique et de l'élasticité de l'air. Il se compose d'un globe de verre *a*

(fig. 93) plein d'eau, et supporté par un fort tube *d* de cristal et creux. Ce globe, qui est fermé à sa partie supérieure par un bouchon de verre, est garni, à sa partie inférieure, de deux tubu-



Fig. 92. — Fontaine de Héron.

lures à petit diamètre, qui restent toujours ouvertes, et qui cependant ne donnent qu'un écoulement intermittent à l'eau qui est dans le vase. En voici la cause : le tube *d*, qui est ouvert aux deux bouts, se prolonge par en haut jusqu'à la partie supérieure du globe, et par l'autre extrémité il est fixé à un support *c* placé

au milieu d'un grand vase. Or, ce support est percé de petits trous qui donnent passage à l'air pour monter dans le tube et pénétrer dans le globe *a*. Cela posé, à mesure que l'eau s'écoule de celui-ci,



Fig. 93. — Fontaine intermittente.

l'air y rentre par les orifices *c*, et la pression intérieure restant constante, l'écoulement continue. Mais peu à peu, par suite de l'eau qui tombe dans le grand vase, le niveau s'y élève au-dessus des orifices *c*, et alors l'air ne peut plus rentrer dans le globe *a*. A partir de ce moment, l'air se raréfiant de plus en plus dans celui-ci, à mesure que l'écoulement continue, il arrive bientôt que

la tension intérieure devient moindre que la pression atmosphérique extérieure qui s'exerce sur l'orifice des tubulures. Cette pression s'oppose donc à la sortie du liquide et l'écoulement s'arrête. Pour qu'il recommence, il faut que l'air puisse pénétrer de nouveau dans le tube *d*, et, pour cela, il faut que les orifices *c* ne soient plus sous l'eau. A cet effet, le grand vase où tombe l'eau porte un orifice *m* qui laisse échapper le liquide en quantité un peu moindre que ce qui est fourni par les deux tubulures supérieures; lors donc que le niveau, dans le grand vase, est descendu au-dessous des orifices *c*, l'air rentrant aussitôt, l'écoulement recommence, et ainsi de suite jusqu'à ce que le globe *a* soit complétement vide.

132. **Encrier siphoïde.** — L'*encrier siphoïde*, qui a pour but de s'opposer à l'évaporation de l'encre en la préservant autant que possible du contact de l'air, est une ingénieuse application de la pression atmosphérique et de l'élasticité de l'air. Il se compose d'un vase de verre, en forme de pyramide tronquée, clos de toutes parts, sauf vers sa partie inférieure à laquelle est soudée une tubulure toujours ouverte (fig. 94). L'encrier est en partie plein d'encre, et au-dessus de celle-ci est de l'air. Le niveau intérieur étant un peu plus haut que dans la tubulure, il en résulte que la tension de l'air renfermé dans l'encrier est un peu moindre que la pression atmosphérique qui pèse sur le liquide de la tubulure. Cela posé, à mesure qu'on puise de l'encre dans celle-ci, son niveau baisse et finit par être plus bas que le point *o*. A ce moment, une bulle d'air pénètre dans l'intérieur et vient s'ajouter à l'air qui y est déjà. La force élastique augmentant aussitôt, le niveau baisse dans l'encrier et monte dans la tubulure, et ainsi de suite jusqu'à ce que le niveau intérieur atteigne le point *o*. Il faut alors introduire de nouveau de l'encre dans l'encrier, ce qui se fait en versant le liquide par la tubulure, en ayant soin d'incliner en même temps l'encrier dans le sens opposé.



Fig. 94. — Encrier siphoïde.

DIFFÉRENTES ESPÈCES DE POMPES.

133. **Pompe aspirante.** — Les *pompes* sont des machines à élever les liquides. Leur invention, qui est fort ancienne, est attribuée à Ctésibius, célèbre mécanicien, qui florissait à Alexandrie, sous Ptolémée Évergète, 130 ans avant J.-C. On a beaucoup varié la forme des pompes ; toutefois elles se ramènent toutes à trois systèmes principaux, qui sont les *pompes aspirantes*, les *pompes foulantes,* et les *pompes aspirantes et foulantes.*

Nous décrirons d'abord la pompe aspirante : cette pompe, représentée dans la figure 95, se compose d'un cylindre de fonte qu'on nomme *corps de pompe.* A sa partie inférieure s'adapte un tuyau d'un moindre diamètre, c'est le *tuyau d'aspiration*, lequel va plonger dans l'eau d'un puits. Au haut de ce tuyau est une soupape à clapet, représentée ouverte dans le dessin. Pouvant s'élever et s'abaisser sans effort, elle établit une communication entre le corps de pompe et le tuyau, quand elle est soulevée, et l'interrompt aussitôt qu'elle est abaissée. Enfin, dans le corps de pompe est un *piston*, qui consiste en un disque épais, de métal ou de bois, garni sur son pourtour de cuir ou d'étoupes, de manière à fermer hermétiquement le corps de pompe. Ce piston est percé, à son centre, d'un trou recouvert d'une soupape, qui est représentée fermée dans la figure. Cette seconde soupape, entièrement semblable à celle qui est au bas du corps de pompe, ouvre, comme elle, de bas en haut. Quant à la mise en mouvement du piston pour monter et descendre, elle a lieu au moyen d'un long levier B, qu'on nomme *brimbale.* Celle-ci, à son extrémité inférieure, reçoit l'effort de l'homme qui fait marcher la pompe, et, par son autre extrémité, elle s'articule à une tige de fer à deux branches *a*, qu'on appelle *bielle,* laquelle est fixée par une charnière à la tige *b* du piston. Comme il importe que la tige du piston monte en ligne droite, elle est guidée dans sa course par une pièce fixe *o*, percée d'un trou dans lequel passe la tige. De la sorte, quand la brimbale joue, la bielle se prête à son mouvement en s'inclinant tantôt en avant, tantôt en arrière, mais la tige *b* monte et descend constamment en ligne droite, ce qui est indispensable, car autrement elle serait brisée ou faussée.

Cela posé, pour comprendre comment l'eau s'élève dans les pompes aspirantes, considérons les figures 96, 97 et 98, qui représentent, dans trois positions successives, le piston et les soupapes

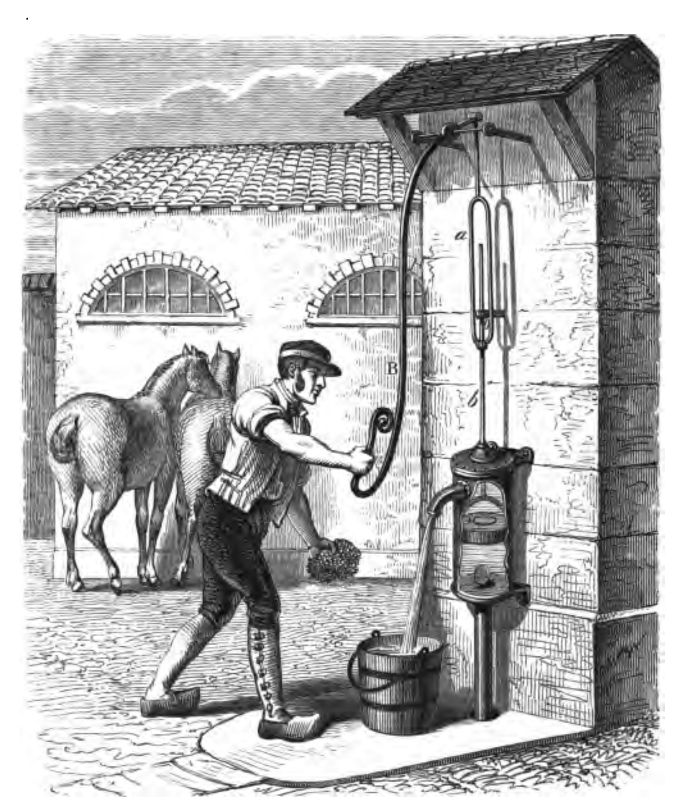


Fig. 95. — Pompe aspirante.

de la pompe décrite ci-dessus. Tant que la pompe n'a pas fonctionné, le corps de pompe et le tuyau d'aspiration sont pleins d'air à la pression atmosphérique; cet air, par conséquent, fait équilibre à la pression qui s'exerce extérieurement sur l'eau du puits;

d'où il résulte que le niveau de l'eau est le même dans celui-ci et dans le tuyau. Or, lorsque le piston monte (fig. 96), la soupape *c* se trouvant alors fermée par son propre poids et par celui de l'atmosphère, le vide se fait au-dessous du piston ; mais en vertu de sa force élastique, l'air qui remplit le tuyau B, ouvre alors la sou-

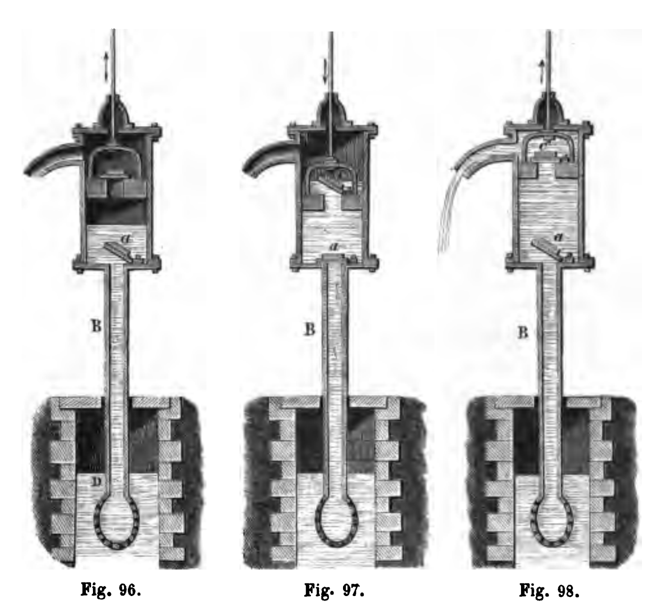


Fig. 96. Fig. 97. Fig. 98.

Coupe de la pompe aspirante.

pape *a*, et passe en partie dans le corps de pompe. L'air qui est dans le tuyau B perdant ainsi en force élastique ce qu'il gagne en volume (123), sa tension ne fait plus équilibre à la pression atmosphérique qui s'exerce extérieurement, en D, sur l'eau du puits. Par suite, l'eau s'élève dans le tuyau, comme le montre le dessin. Si actuellement le piston s'abaisse, la soupape *a* se ferme, et comme l'air qui est ainsi renfermé dans le corps de pompe se trouve de plus en plus comprimé, il vient un moment où sa tension surpassant la pression atmosphérique, la soupape *c* est soulevée, et l'air

s'échappe dans le haut du corps de pompe, et de là dans l'atmosphère. A un second coup de piston ascendant, la même série de phénomènes se reproduit, c'est-à-dire que la soupape *c* retombe et la soupape *a* s'ouvre; l'eau s'élevant de nouveau dans le tuyau d'aspiration finit par passer au-dessus de la soupape *a*, et par remplir complétement le corps de pompe. A partir de ce moment, quand le piston redescend et que la soupape *a* se ferme, l'eau, se trouvant comprimée, soulève la soupape *c* et passe au-dessus du piston, comme le montre la figure 97. Une fois cet effet obtenu, aussitôt que le piston remonte, la soupape *c* se ferme, et l'eau qui est passée au-dessus du piston étant soulevée avec lui, elle se déverse enfin par une tubulure placée latéralement au haut du corps de pompe (fig. 98).

Comme c'est la pression atmosphérique seule qui fait monter l'eau dans le tuyau d'aspiration, il en résulte que la hauteur de la soupape *a*, au-dessus du niveau de l'eau dans le puits, ne peut pas dépasser une certaine limite. En effet, on a vu qu'une colonne d'eau de 10 mètres exerce sur sa base une pression égale à celle de l'atmosphère (110, 2°). Par conséquent, si le tuyau d'aspiration avait plus de 10 mètres de longueur, une fois que l'eau y aurait atteint cette hauteur, la colonne d'eau contenue dans l'intérieur du tuyau d'aspiration ferait équilibre à la pression atmosphérique qui pèse sur l'eau du puits, et, dès lors, l'eau ne pourrait s'élever davantage. C'est donc au plus 10 mètres que peut avoir le tube d'aspiration, et encore cela suppose-t-il qu'on fait le vide parfait dans le corps de pompe, ce qui n'a jamais lieu.

Les anciens, qui ne connaissaient pas la pression atmosphérique, expliquaient l'ascension de l'eau dans les pompes aspirantes en disant que *la nature avait horreur du vide.*

134. **Pompe foulante.** — Dans les pompes foulantes, ce n'est pas la pression atmosphérique qui élève l'eau, mais bien la pression même exercée par le piston pendant qu'il descend. Pour cela, le piston est plein, c'est-à-dire qu'il n'a pas de soupape, et le tuyau d'aspiration est supprimé, le corps de pompe étant plongé au milieu même de l'eau qu'il s'agit d'élever, comme le montrent les figures 99 et 100. Enfin, le corps de pompe, qui n'a qu'une soupape dans la pompe aspirante, en a ici deux : l'une *a*, ouvrant de

bas en haut, est placée à sa base; l'autre *c*, ouvrant de dedans en dehors, est placée à l'orifice d'un long tuyau fixé latéralement au corps de pompe.

D'après cette disposition des soupapes, lorsque le piston monte (fig. 99), le vide se produisant au-dessous de lui, la pression atmosphérique pèse sur la soupape *c* et la ferme hermétiquement,

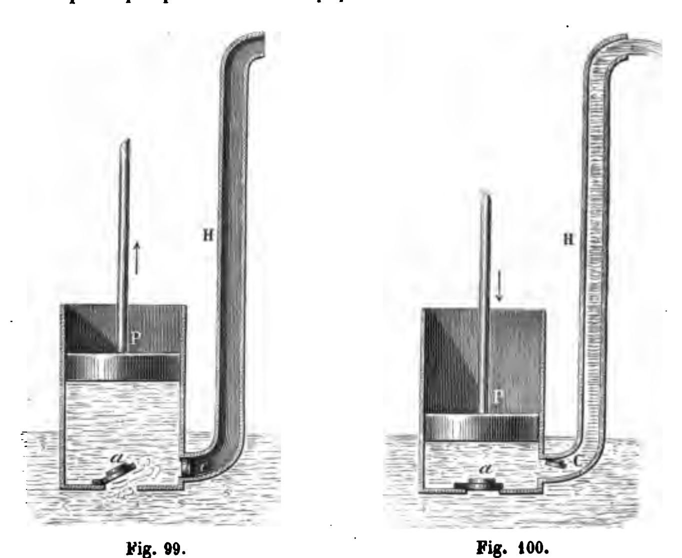


Fig. 99. Fig. 100.

Coupe de la pompe foulante.

tandis que l'eau dans laquelle plonge la pompe, refoulée par son propre poids et par celui de l'atmosphère, soulève la soupape *a* et passe dans le corps de pompe qu'elle remplit entièrement. Un mouvement inverse des soupapes a lieu quand le piston descend (fig. 100). Par son propre poids et par la pression qu'elle supporte, la soupape *a* se ferme, tandis que la soupape *c* s'ouvre pour donner passage à l'eau contenue dans le corps de pompe, laquelle s'élève ensuite dans le tuyau H à une hauteur qui dépend de la pression exercée par le piston. Si cette pression est d'une atmosphère, l'eau s'élève de 10 mètres dans le tuyau H; si elle est

de deux atmosphères, l'eau s'élève de 20 mètres; c'est-à-dire toujours de 10 mètres pour chaque atmosphère de pression. La hauteur à laquelle l'eau peut s'élever n'est donc pas limitée dans ce genre de pompe, comme elle l'est dans la pompe aspirante.

Il est évident, d'après le mécanisme qui vient d'être décrit, que l'eau ne s'élève dans le tuyau d'ascension H que lorsque le piston descend, et qu'elle s'arrête aussitôt que le piston remonte; d'où résulte un écoulement intermittent à l'extrémité du tuyau. Pour obtenir un écoulement plus régulier, on fait agir simultanément deux pompes refoulant l'eau dans un même tuyau d'élévation, mais disposées de manière que quand le piston de l'une remonte, celui de l'autre descend, ce qui force l'eau à s'élever d'une manière continue.

C'est par un semblable système de deux pompes accouplées, que l'huile s'élève jusqu'à la mèche dans les lampes Carcel. Dans le pied de ces lampes, au milieu même de l'huile qui doit les alimenter, sont deux petites pompes foulantes mues par un mouvement d'horlogerie, qu'on monte avec une clef comme une pendule. C'est encore le même système qui est adopté pour la pompe à incendie que nous allons décrire.

135. **Pompe à incendie.** — Dans les incendies, comme il importe de lancer l'eau d'une manière continue, on fait usage de pompes foulantes réunies par couple de deux, et mises en mouvement par un même balancier que font manœuvrer huit hommes, quatre à chaque extrémité. La figure 101 représente la coupe d'une pompe à incendie, c'est-à-dire une vue intérieure. Au balancier PQ sont fixées, à charnière, deux *bielles* qui servent à faire marcher les pistons *m* et *n* renfermés dans deux corps de pompe en cuivre rouge. Ces pompes sont placées dans une cuve MN, de même métal, qu'on nomme *bâche*, et dans laquelle on verse de l'eau tout le temps que la pompe fonctionne. Entre les deux corps de pompe est un réservoir d'air R, percé latéralement d'une ouverture Z à laquelle est adapté un long tuyau de cuir destiné à conduire l'eau sur les lieux enflammés. Ce tuyau se termine à son autre extrémité par un tube conique, en cuivre, qu'on nomme *lance*, et qui n'a que 15 millimètres de diamètre intérieur. Cela posé, voici l'usage du réservoir d'air : quoique le jeu des pistons soit alternatif, comme il y a

nécessairement un instant d'arrêt lorsqu'ils arrivent au haut et au bas de leur course, il s'ensuit qu'il tend à y avoir alors une légère intermittence dans le jet, mais on va voir qu'elle disparaît par l'emploi du réservoir d'air. En effet, l'eau refoulée par les pompes, au lieu d'aller directement au tuyau d'ascension, se rend d'abord

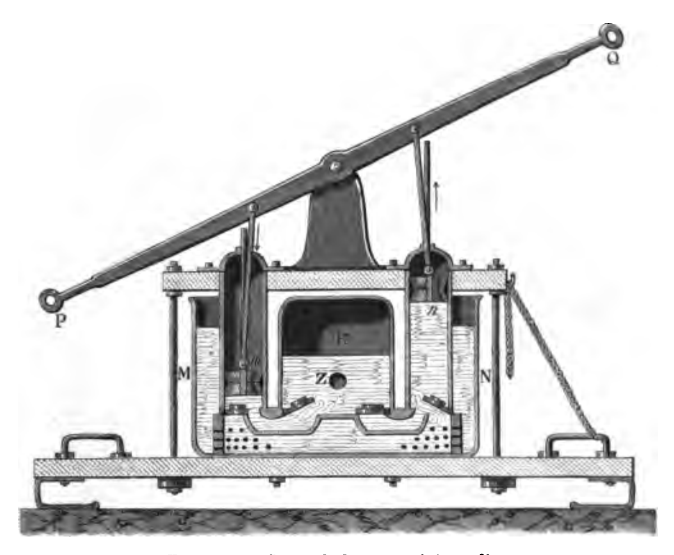


Fig. 101. — Coupe de la pompe à incendie.

dans ce réservoir, comme le montre le jeu des soupapes dans la figure ci-dessus. Or, à cause de la résistance que rencontre l'eau à s'élever dans le tuyau d'ascension et à jaillir par la lance, elle s'écoule du réservoir d'air plus lentement qu'elle n'y arrive. Son niveau monte donc dans ce réservoir, d'où il résulte que l'air qui s'y trouve contenu se réduit de volume, en sorte que c'est cet air comprimé qui, en réagissant sur l'eau aux instants où les pistons s'arrêtent, la force à s'écouler et entretient ainsi la continuité du jet. Une bonne pompe à incendie, manœuvrée par huit hommes, élève l'eau de 30 à 32 mètres.

La figure 102 montre comment fonctionnent les pompes à incendie.

Huit hommes impriment au balancier un mouvement de va-et-vient qui se transmet aux tiges des pistons. Quand ceux-ci montent, ils aspirent l'eau de la bâche; c'est ce qui a lieu, dans la coupe, pour



Fig. 102. — Manœuvre de la pompe à incendie.

le piston *n*, tandis que le piston *m*, qui descend, refoule l'eau dans le réservoir d'air R et de là dans le long tuyau de cuir qui part de ce réservoir; l'autre bout de ce tuyau, terminé par la lance, est tenu et dirigé par un sapeur. Sur le second plan du dessin sont des hommes qui font la chaîne en se passant, de main en main, des seaux pleins d'eau qu'ils versent dans la bâche. Plus loin, est une deuxième pompe manœuvrée de la même manière.

Les pompes à incendie furent établies à Paris, pour la première fois, en 1699, par Dumourrier-Duperrier, gentilhomme provençal, qui les importa de Hollande.

136. **Pompe aspirante et foulante.** — Ainsi que son nom l'indique, cette pompe réunit les effets des deux pompes ci-dessus; c'est-à-dire qu'elle est pourvue à la fois d'un tuyau d'aspiration, qui ne peut avoir plus de 10 mètres, et d'un tuyau d'ascension dont la hauteur n'est pas limitée. Le piston est plein et les soupapes sont disposées de la même manière que dans la figure 99, c'est-à-dire que l'une ouvre de dehors en dedans du corps de pompe et l'autre de dedans en dehors. Lorsque le piston monte, l'eau est soulevée dans le tuyau d'aspiration par la pression atmosphérique; quand il descend, c'est lui qui la refoule dans le tuyau d'ascension à une hauteur dépendant de la puissance du moteur qui fait marcher la pompe.

137. **Siphon.** — On nomme *siphon* un tube recourbé, ouvert à ses deux bouts, dont on se sert pour transvaser les liquides par-dessus les bords des vases qui les contiennent. Cet appareil est utile toutes les fois qu'un liquide ayant déposé au fond d'un vase on ne veut pas le troubler en le dépotant.

Comme le montre la figure 103, les deux branches du siphon sont inégales; la plus courte plonge dans le liquide à transvaser et la plus grande donne issue à l'écoulement. Pour se servir du siphon, il faut commencer par l'*amorcer*, c'est-à-dire par le remplir de liquide, ce qui se fait ordinairement en appliquant la bouche à l'orifice de la grande branche et en aspirant. Le vide se faisant alors dans le siphon, la pression atmosphérique qui pèse en d, sur le liquide dans lequel plonge la courte branche, le force à passer dans le tube, qui se remplit. Retirant ensuite la bouche, on voit le liquide s'écouler d'une manière continue jusqu'à ce que le niveau dans le vase atteigne l'orifice inférieur de la petite branche.

Pour comprendre comment l'eau monte dans la petite branche du siphon, remarquons que la pression atmosphérique qui s'exerce en d, pour refouler l'eau dans la courte branche et la faire passer dans la grande, n'a à surmonter que le poids de la colonne d'eau cd; tandis que la pression atmosphérique qui agit en b, pour renvoyer l'eau de la grande branche dans la petite, a à soulever toute

la colonne d'eau contenue dans la grande branche, et, par suite, rencontre une résistance égale au poids d'une colonne d'eau ayant pour base l'orifice *b*, et pour hauteur *ab*. La résistance qui s'oppose à l'effet de la pression atmosphérique, pour faire passer le liquide d'une branche dans l'autre, est donc plus grande en *b* qu'en *d*; c'est donc la pression en *d* qui l'emporte, et c'est pourquoi le liquide s'écoule de la petite branche vers la grande.



Fig. 103. — Siphon.

La vitesse d'écoulement est d'autant plus rapide que la hauteur *ab* est plus grande que *cd*; par suite, à mesure que le niveau baisse en *d*, la colonne *cd* approchant de plus en plus d'être égale à *ab*, la vitesse diminue. D'où l'on voit que pour que la vitesse d'écoulement fût constante, il faudrait que la différence entre les deux hauteurs *ab* et *cd* fût toujours la même. On arrive à ce résultat en disposant le siphon de manière qu'il s'abaisse en même temps que le niveau de l'eau en *d*, et on a alors ce qu'on appelle un *siphon à écoulement constant*.

CHAPITRE IV

DES AÉROSTATS.

138. **Effet de la pression atmosphérique sur les corps qui flottent dans l'atmosphère.** — On a vu (87) que tout corps plongé dans un liquide supporte, de bas en haut, une poussée égale au poids même du liquide qu'il déplace. Or, ce principe, qui a été démontré sous le nom de *principe d'Archimède*, est général et s'applique aux gaz aussi bien qu'aux liquides. On démontre, par l'expérience, la poussée de bas en haut que supportent les corps plongés dans l'air, à l'aide d'un petit appareil nommé *baroscope*, de deux mots grecs qui signifient *voir le poids*. Il se compose d'un fléau de balance portant, à l'une de ses extrémités, une grosse boule de cuivre creuse, et, à l'autre, une petite masse de plomb. Le poids de cette dernière est réglé de manière à faire exactement équilibre, dans l'air, à la boule de cuivre, c'est-à-dire que le fléau est alors horizontal; mais si l'on place l'appareil sous le récipient de la machine pneumatique et qu'on fasse le vide, on voit le fléau incliner vers la boule de cuivre (fig. 104). Cette dernière pèse donc réellement plus que la masse de plomb. Si son excès de poids n'est pas apparent dans



Fig. 104. — Baroscope.

l'air, c'est que déplaçant un plus grand volume de ce fluide que ne le fait la masse de plomb, elle supporte une plus forte poussée de bas en haut et, par suite, perd plus de son poids.

On peut donc généraliser le principe d'Archimède (88) et dire *que tout corps plongé dans un fluide quelconque, liquide ou gazeux, perd une partie de son poids égale au poids du fluide qu'il déplace*. Il découle de là que lorsqu'on pèse un corps dans l'air, on obtient, en général, un poids trop faible. Pour que le poids fût exact, le volume d'air déplacé par le corps à peser qui est placé dans un des plateaux de la balance, devrait être précisément le même que celui déplacé par les poids qui sont dans l'autre plateau, ce qui n'est pas le cas ordinaire. Ce n'est donc qu'en pesant les corps dans le vide qu'on peut avoir leur véritable poids.

Dans la poussée de bas en haut que supporte un corps plongé dans l'air, il se présente trois cas : ou le corps pèse plus que l'air qu'il déplace, et alors son poids l'emportant sur la poussée de bas en haut, il tombe, c'est le cas le plus général; ou bien, le corps pèse précisément autant que le volume d'air déplacé, et alors les deux forces qui le sollicitent, l'une à s'élever, l'autre à descendre, se faisant équilibre, il reste en suspension dans l'atmosphère; ou enfin, le corps pesant moins que le volume d'air dont il occupe la place, c'est la poussée qui prédomine, et alors le corps s'élève : c'est ce qui a lieu pour la fumée, pour la vapeur d'eau qui forme les nuages, pour les ballons.

139. **Invention des ballons.** — Les *ballons*, ou *aérostats*, sont de vastes globes de taffetas enduit d'un vernis qui le rend imperméable ; ces globes, remplis d'un gaz plus léger que l'air, s'élèvent dans l'atmosphère en vertu de la poussée qu'ils supportent de bas en haut.

L'invention des ballons est due aux deux frères Étienne et Joseph Montgolfier, fabricants de papier dans la petite ville d'Annonay, département de l'Ardèche, où la première expérience eut lieu le 5 juin 1783, en présence des États-Généraux, avec un ballon de toile, doublé de papier, ayant 36 mètres de circonférence, et pesant 250 kilogrammes. Ce ballon étant ouvert à sa partie inférieure, on brûla au-dessous de la paille mouillée, du papier,

de la laine. L'air chaud qui pénétrait ainsi dans son intérieur, le gonfla peu à peu, et quand il fut rempli d'air dilaté, moins dense que l'air extérieur, le poids de l'enveloppe et de l'air chaud qu'elle contenait se trouvant moindre que le poids de l'air déplacé, le ballon s'éleva en quelques instants à plus de deux mille mètres de hauteur, à la grande stupéfaction des nombreux spectateurs; mais il retomba bientôt, l'air chaud qui le remplissait s'étant refroidi rapidement dans les hautes régions de l'atmosphère.

L'expérience d'Annonay eut un grand retentissement dans toute la France, où elle excita partout autant la surprise que l'admiration. Paris, étonné de se voir ainsi devancé par une petite ville de province, se hâta de répéter l'expérience des frères Montgolfier. En attendant l'achèvement d'un immense ballon que faisait construire le gouvernement, sous la surveillance d'Étienne Montgolfier, les frères Robert, mécaniciens, sous la direction de Charles, professeur de physique, construisirent un ballon en taffetas enduit de caoutchouc, n'ayant que 4 mètres de diamètre. Ce petit ballon, au lieu d'être rempli d'air chaud, comme celui des Montgolfier, le fut d'hydrogène, ou air inflammable, comme on l'appelait alors. L'emploi de ce gaz présentait d'incontestables avantages, car étant à peu près quatorze fois plus léger que l'air, il procurait au ballon une force ascensionnelle bien supérieure à celle qu'on pouvait obtenir par l'emploi de l'air chaud; en outre, on n'était plus obligé de brûler des matières combustibles au-dessous du ballon, procédé fort dangereux, puisque le feu pouvait à chaque instant se communiquer à l'aérostat.

Ce fut le 27 août, à cinq heures du soir, au Champ-de-Mars, que ce petit globe inaugura les premiers ballons à gaz hydrogène. Un coup de canon annonça son départ : dépouillé des liens qui le retenaient, il s'éleva avec une vitesse telle qu'il fut porté, en quatre minutes, à plus de 850 mètres de hauteur, puis se perdit dans un nuage. Un second coup de canon annonça sa disparition. La pluie qui tombait n'empêcha pas une foule enthousiaste de le suivre des yeux, en battant des mains, jusqu'à ce qu'il disparût. « Jamais, écrit Mercier, leçon de physique ne fut donnée devant un plus nombreux et plus attentif auditoire. » Ce ballon alla tomber à cinq lieues de Paris, près Gonesse, à la grande surprise des habitants, qui,

ne sachant à qui attribuer ce singulier message, le reçurent avec assez peu de courtoisie.

Pour distinguer les ballons à air chaud des ballons à gaz hydrogène, on a donné aux premiers le nom de ***Montgolfière***, du nom de leurs célèbres inventeurs, et aux derniers celui d'***aérostats***, de deux mots latins qui veulent dire ***se tenir dans l'air***.

140. **Remplissage et ascension des aérostats.** — Les ballons à gaz hydrogène sont les seuls en usage aujourd'hui. On les gonfle soit avec de l'hydrogène, soit avec du gaz d'éclairage, qui est un composé d'hydrogène et de carbone, et qui est plus dense que l'hydrogène, mais bien moins dense que l'air. On l'emploie généralement pour gonfler les ballons, parce que toutes les grandes villes étant éclairées au gaz, on l'obtient plus facilement et à meilleur compte que l'hydrogène, dont la préparation est longue et plus dispendieuse.

La figure 105 représente un ballon gonflé par le gaz d'éclairage. Celui-ci est amené de l'usine où on le prépare, au moyen d'un long tube de cuir qui aboutit à la partie inférieure du ballon. Afin de faciliter l'introduction du gaz dans le ballon, on dresse deux mâts destinés à lui servir de tutelle. Pour cela, aux sommets de ces mâts sont deux poulies sur lesquels s'enroule une corde qu'on peut tendre plus ou moins et qui passe dans un anneau fixé à la partie supérieure de l'aérostat. Par ce mécanisme, celui-ci étant d'abord soulevé d'un mètre environ au-dessus du sol, on fait arriver le gaz; puis, à mesure que le ballon se remplit, on le soulève un peu plus haut, en tendant la corde qui le soutient et en l'aidant à se déployer. Bientôt, non-seulement le ballon n'a plus besoin de tutelle, mais il faut s'opposer à sa force ascensionnelle. Pour cela, on l'enveloppe d'avance d'un filet auquel sont fixées des cordes que des hommes tiennent à la main. Pendant que le ballon est ainsi captif, on détache le tube qui a servi à amener le gaz et on attache la ***nacelle*** au filet. On nomme ainsi une espèce de panier d'osier dans lequel se place l'aéronaute. Lorsqu'il y est monté, au commandement de ***lâchez tout***, les hommes abandonnent les cordes, et le ballon, devenu libre, s'élève avec une vitesse d'autant plus grande que la poussée de bas en haut l'emporte davantage sur son poids. Il suffit que l'excès de cette poussée sur le poids total du ballon

soit de 4 à 5 kilogrammes. Il importe de ne pas gonfler le ballon entièrement, car la pression atmosphérique diminuant à mesure

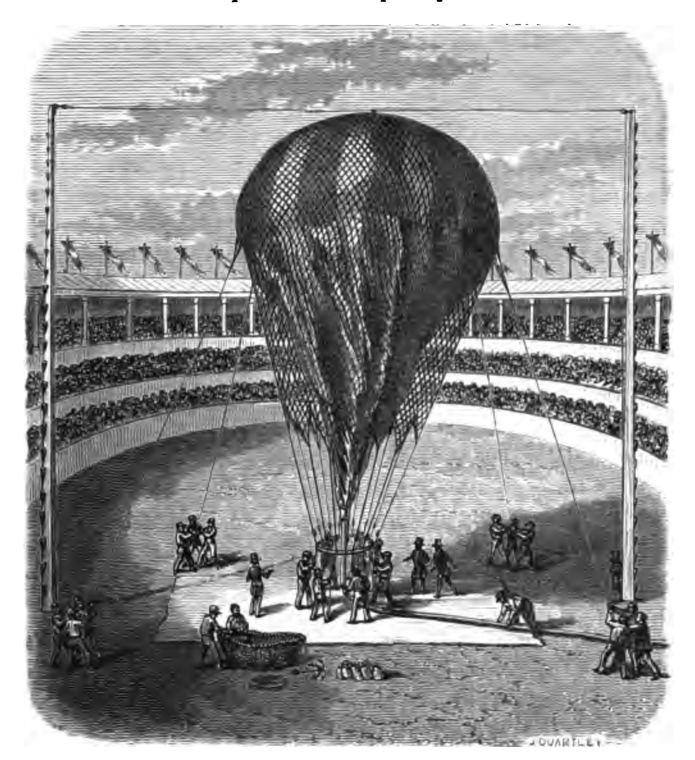


Fig. 105. — Remplissage des ballons.

qu'il s'élève, le gaz intérieur se dilate et ferait crever l'enveloppe, si elle était gonflée complétement dès le départ.

Afin de pouvoir s'élever à volonté, l'aéronaute emporte avec lui du lest consistant en de petits sacs remplis de sable. Si la descente s'effectue trop rapidement, ou dans un endroit périlleux, on vide quelques-uns de ces sacs, et le ballon, ainsi allégé, s'élève de nouveau. On facilite encore la descente en suspendant, par une longue corde, une ancre à la nacelle. Une fois que cette ancre est

fixée à un obstacle, on s'abaisse lentement en tirant sur la corde. Cette ancre et les sacs de toile sont représentés à côté de la nacelle dans la figure 105. Enfin, au sommet du ballon est une ouverture fermée par un esoupape qui est retenue par un ressort et s'ouvre de dehors en dedans. On fait marcher cette soupape au moyen d'une corde qui descend jusqu'à la nacelle. Lorsque l'aéronaute veut effectuer sa descente, il tire la corde, et la soupape s'ouvrant, une partie de l'hydrogène contenu dans le ballon s'échappe et est remplacée par de l'air; or, celui-ci étant plus pesant que l'hydrogène, fait descendre le ballon.

C'est à l'aide du baromètre qu'une fois dans les hautes régions de l'atmosphère, l'aéronaute reconnaît s'il monte ou s'il descend. Dans le premier cas, la colonne de mercure baisse dans le tube barométrique, car la pression diminue; dans le second, au contraire, le mercure monte.

141. **Parachute.** — Le *parachute* est un appareil à l'aide duquel un aéronaute peut abandonner son ballon et se laisser descendre assez lentement pour ne pas se blesser. Il consiste en une toile circulaire d'environ 5 mètres de diamètre et présentant, quand elle est tendue, la forme d'un vaste parapluie dont les baleines sont remplacées par des cordes, qui se prolongent pour aller s'attacher toutes à une même nacelle. Tantôt, le parachute, reployé comme un parapluie fermé, est attaché à la partie inférieure du ballon, et au-dessous de lui pend la nacelle; tantôt, le parachute est attaché sur le côté du ballon, et ses cordes viennent se réunir à une nacelle plus petite placée dans celle qui est attachée au filet en corde qui enveloppe le ballon. Lorsque l'aéronaute veut descendre en parachute, il lui suffit, étant dans la nacelle fixée à celui-ci, de lâcher la corde qui lie le parachute au ballon au moyen d'une poulie. La descente s'accomplit aussitôt avec une vitesse effrayante; mais l'air qui s'engouffre dans les plis du parachute, le force à s'ouvrir, et aussitôt, vu la grande surface qu'il présente à l'air, la descente s'opère avec une lenteur suffisante pour que l'aéronaute atteigne la terre sans choc trop brusque. Un trou, placé au centre du parachute, sert à laisser échapper l'air comprimé par la toile. Sans cette précaution, le parachute oscillerait d'une manière dangereuse pour celui qui est dans la nacelle.

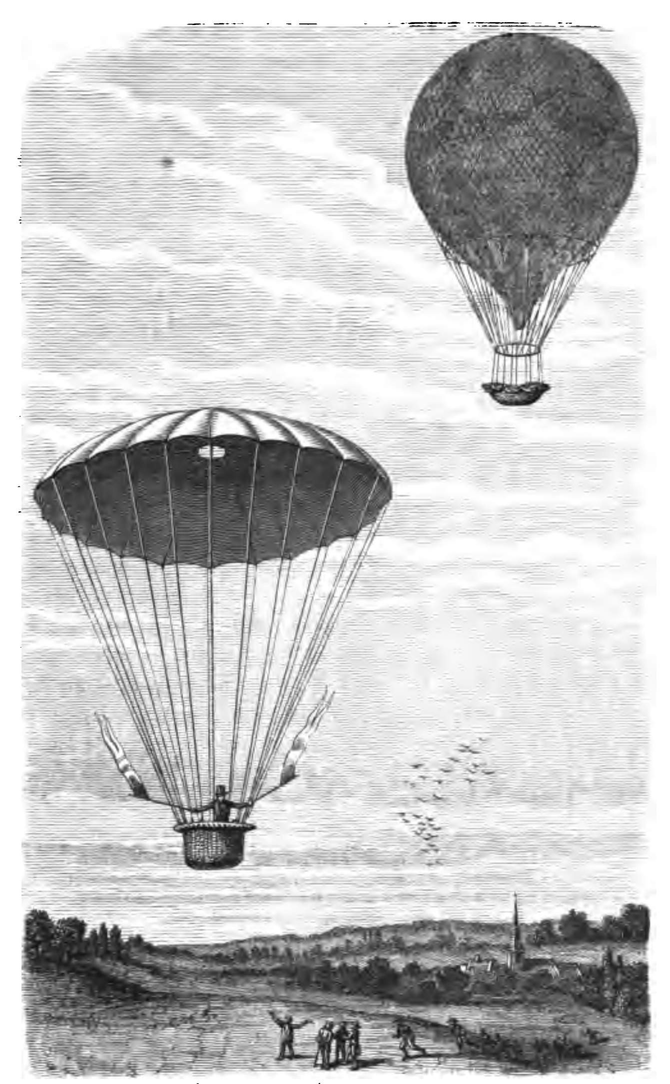


Fig. 106. — Parachute.

L'essai du parachute fut d'abord fait sur des animaux. Blanchard laissa tomber ainsi son chien d'une hauteur de 2000 mètres. Un tourbillon l'arrêta dans sa chute et le porta au-dessus des nuages. L'aéronaute rencontra bientôt après le parachute et le pauvre animal qui fit éclater par des aboiements répétés, son inquiétude et sa joie de retrouver son maître. Un nouveau courant les sépara; mais le parachute et le chien gagnèrent la terre sains et saufs peu de temps après l'aéronaute.

L'invention des parachutes est attribuée à Blanchard, mais c'est J. Garnerin qui, le premier, dans une nacelle soutenue par un de ces appareils (fig. 105), osa se laisser tomber d'une hauteur de 1000 mètres.

142. **Ascensions aérostatiques remarquables.** — Aussitôt après la découverte des ballons, de hardis expérimentateurs osèrent confier leur vie à ces vastes appareils, et s'élever avec eux dans les airs. Le 15 octobre 1783, quatre mois et quelques jours après l'expérience d'Annonay, un jeune enthousiaste de physique, Pilâtre de Rozier, s'éleva, le premier, dans un ballon à air chaud, à une hauteur de 30 mètres environ; mais ce ballon était captif, c'est-à-dire retenu par des cordes. Ce n'est que le 31 novembre suivant que le même Pilâtre de Rozier et le chevalier d'Arlandes eurent, les premiers, la gloire de faire un voyage aérien dans un ballon libre. Les préparatifs eurent lieu dans le jardin de la Muette, au bois de Boulogne, en présence de toute la cour. Après un voyage de vingt-cinq minutes, les hardis voyageurs prirent terre, de l'autre côté de Paris, près du moulin de Croulebarbe. Leur ballon était gonflé à l'air chaud; pour cela, au milieu de la nacelle était un réchaud dans lequel ils brûlaient de temps en temps une botte de paille pour entretenir la dilatation de l'air. On conçoit combien ce procédé était dangereux, puisque à chaque instant le feu pouvait se communiquer au ballon.

La route était désormais frayée. Quelques jours après, l'expérience de la Muette était répétée dans le jardin des Tuileries par le physicien Charles et par l'un des frères Robert, non toutefois avec ce redoutable feu de paille, qui faisait du premier voyage aérien quelque chose d'effrayant, mais à l'aide du gaz hydrogène.

Depuis cette époque, les ascensions aérostatiques furent nom-

breuses. Une tristement célèbre fut celle dans laquelle l'infortuné Pilâtre de Rozier perdit la vie. Voulant combiner les deux procédés de Charles et de Montgolfier, il réunit deux ballons, l'un plein d'hydrogène, l'autre à air chauffé au moyen de feu de paille. Or, l'appareil ayant été incendié et précipité du haut des airs, le malheureux aéronaute périt victime de sa témérité. Nous citerons encore le voyage de Blanchard, qui, le 7 janvier 1785, en compagnie du docteur Jeffries, fit, le premier, la traversée de Douvres à Calais, où l'on éleva une pyramide pour rappeler le souvenir de ce voyage aérien. Du reste, les deux voyageurs faillirent plusieurs fois tomber dans la mer, et ils n'atteignirent les côtes de France qu'après avoir jeté hors de la nacelle, tout leur leste, leurs instruments et jusqu'à leurs vêtements, afin d'alléger leur ballon.

L'ascension de Gay-Lussac, le 16 septembre 1804, fut la plus remarquable par les faits dont elle enrichit la science, et par la hauteur qu'atteignit le célèbre physicien, hauteur qui fut de 7016 mètres au-dessus du niveau des mers. A cette hauteur, le baromètre était descendu à 32 centimètres, et le thermomètre, qui marquait 31 degrés à la surface du sol, était alors à 9 degrés et demi au-dessous de zéro.

Dans ces hautes régions, la sécheresse est si grande, que les substances hygrométriques, telles que le papier, le parchemin, se dessèchent et se tordent comme si on les présentait au feu. La respiration et la circulation s'accélèrent à cause de la grande raréfaction de l'air. Gay-Lussac a constaté que son pouls faisait alors 120 pulsations à la minute, tandis qu'à l'ordinaire il n'en battait que 66. Enfin, à cette grande hauteur, le ciel prend une teinte bleue très-foncée, tirant sur le noir, et un silence absolu et solennel entoure l'aéronaute.

Parti de la cour du Conservatoire des Arts-et-Métiers à dix heures du matin, Gay-Lussac descendit au bout de six heures près de Rouen, ayant fait environ 30 lieues.

143. **Applications des aérostats.** — Jusqu'ici la principale application des aérostats a été de faire des observations de physique et de météorologie dans les hautes régions de l'atmosphère. Dès leur origine, on proposa de les appliquer à l'art de la guerre, pour observer les mouvements de l'ennemi à l'aide de ballons captifs.

A la bataille de Fleurus, le 16 juin 1794, le général Moreau se tint, pendant deux heures, à 400 mètres de hauteur, dans un ballon retenu captif par des cordes, et observant de là les dispositions de l'ennemi, il les fit connaître par deux lettres successives au général Jourdan. Le gain de la bataille fut en partie attribué aux renseignements utiles qu'on avait puisés à cette source. Mais les ballons ne pourront être d'une véritable utilité que du jour où il sera possible de les diriger. Or, les tentatives faites jusqu'ici dans ce but ont complétement échoué. On n'a aujourd'hui d'autre moyen que de s'élever dans l'atmosphère jusqu'à ce qu'on rencontre un courant d'air qui mène à peu près dans la direction qu'on veut suivre.

LIVRE IV

ACOUSTIQUE.

CHAPITRE PREMIER

PRODUCTION ET PROPAGATION DU SON

144. **Objet de l'acoustique, cause du son.** — On nomme *acoustique*, d'un mot grec qui signifie *entendre*, la partie de la physique qui traite des sons, c'est-à-dire qui a pour objet de faire connaître comment ils se forment et comment ils se transmettent d'un lieu à un autre; cette science s'occupe aussi des rapports qui existent entre les sons, mais abstraction faite des sentiments et des passions qu'ils peuvent éveiller en nous, car les sons considérés sous ce point de vue, rentrent dans le domaine de la musique. Pour se convaincre de l'intérêt qu'offre l'étude de l'acoustique, il suffit d'observer que deux de nos organes, la voix et l'ouïe, sont exclusivement affectés, l'un à produire des sons, l'autre à les percevoir.

Le *son* est une sensation particulière excitée dans l'organe de l'ouïe. Il a toujours pour cause un mouvement de va-et-vient rapide imprimé aux molécules d'un corps élastique, et communiqué par celui-ci aux couches d'air avec lesquelles il est en contact. En effet, prenons pour exemple une corde d'instrument fortement tendue, qu'on pince ou qu'on fait vibrer avec un archet (fig. 107). Lorsqu'on a fait passer cette corde de sa position d'équilibre *acb*, où elle est rectiligne, à la position *adb*, où elle est curviligne, tous ses points se trouvent plus ou moins éloignés de leur position d'équilibre; d'où il résulte qu'aussitôt que la corde est abandonnée à elle-même, elle tend, en vertu de son élasticité, à reprendre sa position première *acb*. Elle y revient, en effet, mais,

en vertu de sa vitesse acquise, elle la dépasse et s'écarte au delà jusqu'en *aeb*, tous ses points étant alors très-sensiblement autant éloignés de leur position d'équilibre qu'ils l'étaient en *adb*. Or, l'élasticité de la corde agissant actuellement comme la première fois, non-seulement la corde revient à la position *acd*, mais elle la dépasse de nouveau, et ainsi de suite, faisant des écarts de moins en moins grands, comme le représentent les lignes ponctuées dans la figure ci-après, jusqu'à ce qu'elle revienne enfin à son état d'équilibre primitif. On voit donc que chaque point de la corde est animé d'un mouvement de va-et-vient, ou mouvement vibratoire, tout à fait comparable à celui du pendule (52). Comme pour celui-ci, le passage de la position *adb* à la position *aeb* constitue une *oscillation simple;* tandis que l'allée et le retour d'une position à

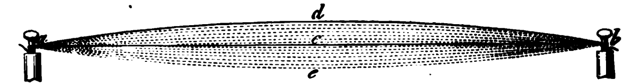


Fig. 107. — Vibrations des cordes.

l'autre forment une *oscillation double* ou *complète;* c'est-à-dire que l'oscillation complète est formée de deux oscillations simples consécutives.

Tout corps qui vibre ainsi en rendant un son, est un *corps sonore.* Les oscillations des corps sonores sont trop rapides pour qu'on puisse les compter et même les voir d'une manière distincte. Cependant, on peut les rendre sensibles à l'œil de plusieurs manières. Par exemple, si l'on fait résonner un globe de verre un peu grand, en le frappant avec le doigt, puis qu'on approche une petite bille d'ivoire suspendue à un fil, on voit celle-ci recevoir des chocs rapides des parois de ce globe, ce qui prouve leur mouvement vibratoire. Ou bien, on fixe horizontalement une plaque de métal par un de ses points, et on place dessus une légère couche de sable fin, puis on la fait vibrer en passant un archet sur ses bords; aussitôt le sable s'agite d'une manière remarquable, saute et retombe avec une grande vitesse, ce qui est évidemment dû aux vibrations de la lame.

145. Propagation du son dans l'air, ondes sonores. — Après

avoir constaté que, lorsqu'un corps résonne, ses molécules effectuent des vibrations rapides, il nous reste à faire voir comment ces vibrations se transmettent jusqu'à l'oreille pour y faire naître la sensation du son. Or, cette transmission a toujours lieu par l'intermédiaire d'un milieu élastique en contact d'un côté avec le corps qui rend un son, et de l'autre avec l'organe de l'ouïe. C'est ordinairement l'air qui sert ainsi de véhicule au son. Ce fluide étant très-mobile, très-compressible, très-élastique, ses molécules, en contact avec les différents points du corps sonore, prennent des mouve-

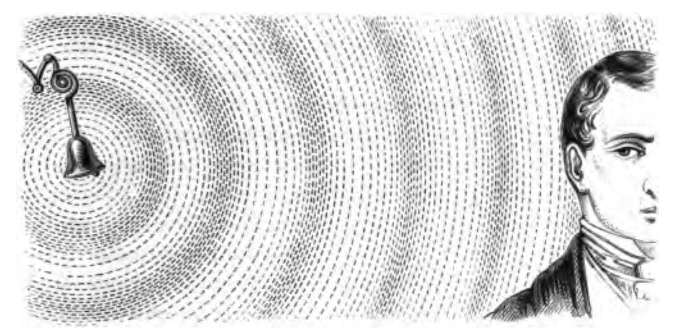


Fig. 108. — Propagation des ondes sonores

ments semblables à ceux de ces points; elles vont et viennent avec eux, en sorte que chaque molécule d'air en contact avec le corps est poussée en avant, dans la direction du son, puis revient sur elle-même après avoir communiqué son mouvement à la molécule qui la suit immédiatement; puis celle-ci agit de même sur la molécule qui vient après elle, et ainsi de suite jusqu'aux molécules en contact avec le *tympan*. On nomme ainsi une membrane placée au fond du canal auditif de l'oreille, et destinée à recevoir les vibrations de l'air qu'elle transmet, par une suite de petits osselets et de liquides, jusqu'au nerf acoustique et de là au cerveau, qui perçoit enfin la sensation du son.

A chaque impulsion imprimée par un corps qui résonne, aux molécules d'air qui sont en contact avec lui, ces molécules pressant à leur tour celles qui les suivent, il se produit dans l'air, jus-

qu'à une certaine distance, une partie condensée qu'on désigne sous le nom d'*onde condensée ;* puis, quand le corps vibrant revient sur lui-même, les molécules d'air les plus proches le suivant dans son mouvement, il en résulte dans l'air une partie raréfiée, qui suit l'onde condensée, et qu'on nomme elle-même l'*onde raréfiée.* L'ensemble de l'onde condensée et de l'onde raréfiée constitue une *onde sonore.* C'est par le développement toujours croissant des ondes sonores, sous la forme de sphères dont le corps vibrant est le centre, que le son se propage dans toutes les directions (fig. 108). Lorsqu'on jette une pierre dans une eau tranquille, il se forme, autour du point où elle tombe, une série d'ondes concentriques qui vont toujours en se développant et qui donnent assez bien une idée de la propagation des ondes sonores dans l'air.

146. **Coexistence des ondes sonores.** — Il est à remarquer que plusieurs sons peuvent se propager simultanément dans l'air sans se nuire les uns aux autres, toutes les ondes se pénétrant et se croisant dans l'espace sans se modifier. En effet, dans les symphonies les plus compliquées, une personne dont l'oreille est exercée reconnaît et suit facilement les sons de chaque instrument. Toutefois, un son trop intense nuit à un son faible; par exemple, le son du tambour couvre la voix. Il arrive aussi que des sons trop faibles ou trop éloignés pour être entendus distinctement s'ajoutent pour produire un son confus qui devient perceptible à l'oreille. Telle est la cause du murmure des eaux, du bruissement des feuilles dans les forêts, du mugissement des vagues sur le rivage des mers.

147. **Le son ne se propage pas dans le vide.** — Le son ayant pour cause les ondulations excitées dans l'air par les vibrations des corps élastiques, il est évident que si entre un corps vibrant et l'organe de l'ouïe, il n'existe aucun milieu élastique qui puisse transmettre à ce dernier les vibrations du corps, il n'y a plus aucun son possible. Le milieu qui nous transmet les vibrations des corps sonores est ordinairement l'air, mais il pourrait être un gaz quelconque, même une vapeur, un liquide ou un solide.

Pour démontrer, par l'expérience, que le son ne se propage que par l'intermédiaire d'un milieu élastique, on prend un ballon de verre un peu grand, muni d'un robinet, dans l'intérieur duquel est suspendue, par un fil, une petite clochette (fig. 109). Ayant fait

le vide dans ce ballon, au moyen de la machine pneumatique, on l'agite pour faire résonner la clochette, mais elle ne fait entendre aucun son. Or, si ouvrant le robinet, on fait rentrer dans le ballon, de l'air, un gaz quelconque ou une vapeur, on entend distinctement le son chaque fois qu'on secoue le ballon.

On fait encore cette expérience en plaçant sous le récipient de la machine pneumatique une sonnerie mue par un mouvement d'horlogerie, un réveille-matin, par exemple. Tant que le récipient est plein d'air, on entend résonner le timbre de la sonnerie; mais, à mesure qu'on raréfie l'air, le son s'affaiblit et cesse tout à fait lorsque le vide est complet. Toutefois, il faut pour cela disposer la sonnerie sur de la ouate; sinon les pièces dont elle est composée transmettent le son au plateau de la machine pneumatique, et celui-ci à l'air extérieur. Il est même difficile d'éteindre entièrement le son qui tend ainsi à être conduit au dehors.

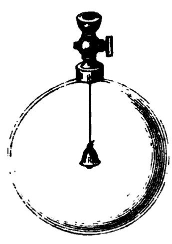


Fig. 109. — Sonnette dans le vide.

Plus on s'élève sur les hautes montagnes, plus l'air devient rare et léger, et plus le son perd de sa force. Saussure ayant tiré un coup de pistolet sur le Mont-Blanc, n'entendit qu'un faible bruit semblable à celui d'un bâton qu'on brise. Si, nous élevant davantage, nous pouvions dépasser les limites de notre atmosphère et vivre dans le vide, nous serions toujours entourés du silence le plus profond.

148. **Propagation du son dans les liquides et dans les solides.** — Le son ne se propage pas seulement dans les gaz, mais aussi dans les liquides et dans les corps solides. En effet, les plongeurs entendent sous l'eau les bruits qui partent du rivage, et réciproquement de celui-ci on perçoit les sons produits au fond de l'eau. Quant aux solides, ils conduisent si bien le son, que si l'on parle à voix basse à l'extrémité d'une poutre de sapin de 20 à 25 mètres de longueur, on est entendu par une personne qui applique son oreille à l'autre bout, tandis qu'une personne placée à une distance beaucoup moindre n'entend rien. De même, le son se propage si facilement dans le sol que, la nuit, en appliquant l'oreille contre terre, on peut entendre, à de grandes distances, des pas de che-

vaux ou tout autre bruit. C'est par le même effet que, dans la construction des galeries souterraines, le mineur se guide par le son transmis à travers des masses considérables de rochers, vers le mineur qu'il doit rejoindre.

149. **Vitesse du son dans l'air.** — Un grand nombre de phénomènes nous font voir qu'il faut au son un certain temps pour se



Fig. 110. — Mesure de la vitesse du son.

propager d'un lieu à un autre. Par exemple, si l'on fait attention aux coups que frappe un bûcheron sur une colline opposée à celle où l'on se trouve, on voit sa hache tomber en silence, et on n'entend le son que lorsque l'outil déjà relevé se prépare à tomber de nouveau. De même, pendant la nuit, si un chasseur tire au loin une arme à feu, l'explosion n'est entendue que quelques instants après qu'on a vu la lumière qui l'accompagne. Enfin, le bruit de la foudre n'éclate qu'un certain temps après l'apparition de l'éclair, quoique, dans la nue, l'éclair et le roulement du tonnerre se produisent simultanément.

Pour déterminer expérimentalement la vitesse avec laquelle le son se transmet dans l'air, les membres du bureau des longitudes de l'Observatoire de Paris firent, en juin 1822, pendant la nuit,

l'expérience suivante : on plaça une pièce de canon sur la butte de Montlhéry, près de Paris, et une autre sur un plateau, près de Villejuif. La distance des deux stations ayant été mesurée avec soin et trouvée être de 18612 mètres, on tira, dans chaque station, à des intervalles de 10 minutes, douze coups de canon (fig. 110).

Des observateurs placés auprès des pièces notaient, à l'aide de montres à secondes, le temps qui s'écoulait entre l'audition du son et l'apparition de la lumière au moment de l'explosion, lequel fut trouvé être de 54^s,6. Or, ce temps était précisément celui que mettait le son à se propager d'une station à l'autre, car on verra, en étudiant la lumière, qu'elle se propage avec une si grande vitesse (77000 lieues par seconde) que le temps qu'il lui faut pour parcourir une distance de 18612 mètres est tout à fait inappréciable. On arrivait donc à ce résultat que le son parcourt 18612 mètres en 54^s,6, ce qui revient à 340 mètres 89 centimètres par seconde.

Pendant l'expérience que nous venons de décrire, la température de l'air était de 16 degrés. A une température moindre, l'air devient plus dense et la vitesse du son diminue. A 10 degrés, qui est la température moyenne de l'air dans nos climats, la vitesse du son n'est que de 337 mètres, et à zéro degré, seulement de 333.

La connaissance de la vitesse du son peut servir à mesurer les distances. Par exemple, veut-on calculer à quelle distance on serait placé d'une arme à feu dont le son ne se ferait entendre que 35 secondes après la détonation? on dira : puisqu'en une seconde le son parcourt 337 mètres, il doit parcourir en 35 secondes 35 fois 337 mètres, ou 11795 mètres; telle est donc la distance cherchée. On pourrait de la même manière calculer la profondeur d'un puits d'après le nombre de secondes qui s'écoule entre l'instant où on y laisse tomber une pierre, et celui où le son qu'elle a produit en frappant l'eau revient à l'oreille. Toutefois, le calcul est ici plus compliqué, parce qu'il faut tenir compte du temps que la pierre met à tomber.

La vitesse du son n'est pas la même dans tous les gaz. Elle est, en général, d'autant plus grande que le gaz est moins dense. Mais dans un même gaz, tous les sons, forts ou faibles, graves ou aigus, se transmettent avec la même vitesse. En effet, s'il en était autrement, lorsqu'on entend, par exemple, une musique militaire d'un

peu loin, l'harmonie serait détruite, ce qui est contraire à l'observation.

150. **Vitesse du son dans les liquides et dans les solides.** — On a déjà vu que les liquides et les solides conduisent très-bien le son, mais, de plus, ils le conduisent beaucoup plus rapidement que l'air. En effet, dans des expériences faites sur le lac de Genève, pendant la nuit, avec une cloche plongée sous l'eau et mise en vibration par un marteau dont le manche, au moment du choc, enflammait une petite quantité de poudre à la surface de l'eau, on a trouvé que la vitesse du son, dans l'eau, est de 1435 mètres par seconde, ce qui est plus de quatre fois celle qui a lieu dans l'air.

On constate facilement que le son se propage plus vite dans les solides que dans l'air. Il suffit d'appliquer l'oreille à l'extrémité d'une barre de fer un peu longue, tandis qu'une autre personne frappe l'extrémité avec un corps dur : on entend alors deux bruits, l'un, celui qui arrive le premier, transmis par la barre, l'autre transmis par l'air. On a ainsi reconnu que la vitesse du son, dans le fer, est dix-sept fois plus grande que dans l'air. Elle n'est pas tout à fait aussi grande dans les autres métaux.

151. **Réflexion du son.** — On a vu que le son se propage dans l'air au moyen d'ondes sphériques, alternativement condensées et raréfiées, ayant pour centre le corps sonore, et se développant autour de lui dans toutes les directions (fig. 108). Tant que la masse d'air au milieu de laquelle les ondes sonores vont ainsi en se propageant est continue, il en est de même de ces ondes; mais s'il se rencontre quelque obstacle qui les arrête, elles sont comme repoussées par cet obstacle, à la manière d'une bille élastique qui frappe contre un mur, et elles prennent alors une nouvelle direction; ce qu'on exprime en disant qu'elles sont ***réfléchies.***

La réflexion du son, ou plutôt des ondes sonores, suit les mêmes lois que la réflexion de la chaleur et de la lumière, lois que nous ferons connaître plus tard.

152. **Échos et résonnances.** — On nomme *écho* la répétition d'un son par suite de la réflexion des ondes sonores sur un obstacle plus ou moins éloigné. Par exemple, si l'on prononce d'une voix forte une phrase de quelques mots, à une certaine distance d'un bois, d'un rocher, d'un édifice, il arrive, en général, qu'un instant

après on entend la même phrase comme répétée dans le lointain par une autre personne ; ce sont les ondes sonores qui reviennent, réfléchies par le bois, le rocher ou l'édifice. Toutefois, pour que le son réfléchi puisse être distingué du son articulé, il est nécessaire d'être à 34 mètres environ de la surface réfléchissante.

En effet, il n'est guère possible de prononcer ou d'entendre distinctement plus de cinq syllabes en une seconde. Or, la vitesse du son étant sensiblement de 340 mètres par seconde (149), il s'ensuit que, dans un cinquième de seconde, le son parcourt 68 mètres. Cela posé, si l'obstacle réfléchissant est distant de 34 mètres, le son aura à parcourir, tant pour aller que pour revenir, 68 mètres. Il lui faudra donc un cinquième de seconde; par suite, l'écho sera *monosyllabique*, c'est-à-dire qu'il répétera distinctement la dernière syllabe réfléchie, mais seulement celle-là, parce que, pour les autres, chaque syllabe réfléchie se confondra avec la syllabe articulée suivante. Si la surface réfléchissante est distante de deux fois 34 mètres, l'écho sera *dissyllabique ;* si elle l'est de trois fois 34 mètres, il sera *trissyllabique ;* et ainsi de suite.

On rencontre aussi des échos *multiples*, c'est-à-dire qui répètent plusieurs fois le même son ; ce phénomène se produit lorsque deux obstacles réfléchissant, placés l'un vis-à-vis de l'autre, deux murs parallèles, par exemple, se renvoient successivement les ondes sonores. On cite, à trois lieues de Verdun, un écho multiple formé par deux tours parallèles, distantes l'une de l'autre de 50 à 60 mètres. En se plaçant entre elles et prononçant un mot à haute voix, il est répété douze fois. L'écho le plus remarquable en ce genre est celui du château de Simonetta, en Italie, qui répète quarante à cinquante fois un coup de pistolet. Les échos modifient, en général, le son; les uns le répètent avec fracas, d'autres comme avec un rire moqueur ou un accent plaintif.

On vient de voir qu'il y a écho distinct toutes les fois que le corps qui réfléchit les ondes sonores est distant de 34 mètres ou davantage ; mais qu'arrive-t-il quand il est à une distance moindre? Le son ayant alors à parcourir, tant pour aller que pour revenir, moins de 34 mètres, il en résulte que le son réfléchi revient avant un cinquième de seconde, et que dès lors il empiète sur le son articulé. On ne peut donc les entendre séparément, mais le son se

trouve renforcé, ce qu'on exprime en disant qu'il y a ***résonnance.*** Tout le monde a observé, en effet, qu'une personne qui parle dans un appartement fermé se fait beaucoup mieux entendre que celle qui parle en plein air.

Les effets de la résonnance sont d'autant plus sensibles que les parois sur lesquelles les ondes sonores se réfléchissent sont plus élastiques. Dans les maisons qui ne sont pas habitées, où il n'y a pas de meubles, les murs, les planchers, les plafonds vibrent facilement, et on sait combien le bruit des pas et le son de la voix sont alors retentissants. Au contraire, là où il y a des tentures et des draperies qui sont peu élastiques et réfléchissent mal le son, les appartements sont ***sourds.***

153. **Causes qui modifient l'intensité du son.** — Plusieurs causes modifient l'intensité du son, savoir : la distance, l'amplitude des vibrations, la densité de l'air, la direction du vent et le voisinage de corps susceptibles d'entrer en vibration.

1° C'est un phénomène bien connu que l'affaiblissement du son à mesure qu'on s'éloigne du lieu où il se produit. Son intensité décroît même alors assez rapidement, car on démontre qu'elle est en raison inverse du carré de la distance; c'est-à-dire, qu'à une distance double, le son est quatre fois moins intense; à une distance triple, neuf fois moins, et ainsi de suite; ainsi, pour se faire entendre à une distance double, il faut crier quatre fois plus fort.

2° L'intensité du son décroît avec l'amplitude des vibrations du corps sonore. Par exemple, si l'on observe une corde métallique tendue qu'on fait vibrer, on la voit d'abord, quand elle est un peu longue, effectuer des vibrations d'une grande étendue, et c'est alors que le son est plus intense; mais il s'affaiblit à mesure que l'amplitude des vibrations décroît. C'est par la même cause que le son mourant des derniers coups d'une cloche s'affaiblit graduellement jusqu'au moment où il s'éteint tout à fait.

3° La densité de l'air exerce aussi une influence sur l'intensité du son. En effet, on a déjà vu que le son s'affaiblit sur les hautes montagnes, où l'air est moins dense, et sous le récipient de la machine pneumatique quand on y raréfie l'air (147). Pendant les fortes gelées, on entend de plus loin, parce que l'air est plus dense et plus homogène. Les gens de la campagne présagent la pluie d'après

le son de la cloche de leur village. Ce son est en effet modifié par la vapeur d'eau qui est dans l'air, laquelle en change la densité et l'élasticité.

4° La force et la direction du vent exercent un effet puissant sur l'intensité des sons et sur la distance à laquelle ils peuvent être



Fig. 111. — Propagation du son dans les tuyaux.

entendus. Si le son nous arrive du côté que souffle le vent, nous l'entendons à une grande distance ; c'est l'inverse qui a lieu quand le vent souffle dans une direction opposée. Tout le monde a été à même de faire cette observation pour le son de la voix, pour celui des cloches, pour le bruit du canon.

5° Le son peut gagner considérablement en intensité quand le corps sonore est en contact, ou même dans le voisinage d'un autre corps susceptible d'entrer en vibration avec lui. Par exemple, une corde d'instrument tendue dans l'air, loin de tout corps sonore, ne rend qu'un son très-faible lorsqu'on la fait vibrer ; mais si elle est tendue au-dessus d'une caisse remplie d'air, comme dans la guitare, le violon, la basse, elle rend un son plein et intense, ce qui provient de ce que la caisse et l'air qu'elle contient vibrant à

l'unisson avec la corde, le son est considérablement renforcé. De là l'utilité des caisses sonores dans les instruments à cordes. C'est par la même raison que les anciens plaçaient sur leurs théâtres des vases d'airain résonnants, destinés à renforcer la voix des acteurs.

154. **Intensité du son dans les tuyaux.** — C'est le développement toujours croissant que prennent les ondes sonores en se propageant

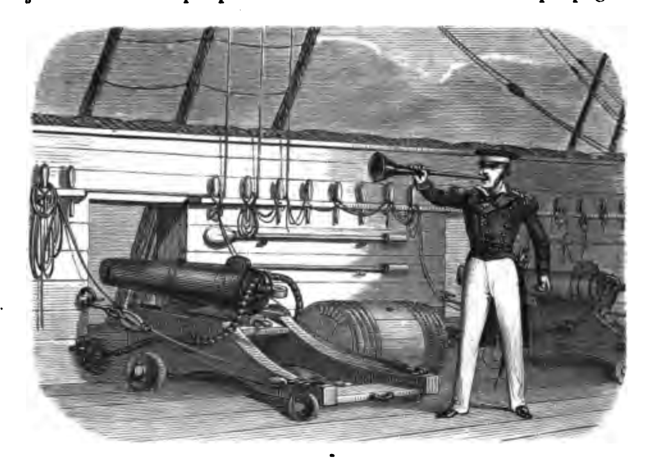


Fig. 112. — Porte-voix.

sous la forme de sphères, qui est cause de l'affaiblissement des sons par l'effet de l'éloignement; mais si l'on force les ondes à ne se propager que dans un seul sens, comme il arrive dans un long tuyau, le son peut être transmis à des distances considérables sans altération bien sensible. En effet, dans un tuyau de 950 mètres de longueur, employé à la conduite des eaux dans Paris, M. Biot a pu entretenir facilement, d'une extrémité à l'autre, une conversation à voix basse avec une autre personne; et la voix se propageait si bien, qu'on n'avait qu'un seul moyen, dit l'illustre savant, de ne pas être entendu, *c'était de ne pas parler du tout.*

La propriété qu'ont les tubes de conduire les sons à de grandes distances a été utilisée pour transmettre des ordres dans les hôtels et dans les grands établissements. Il suffit pour cela de disposer des

tubes de caoutchouc dont une extrémité aboutit au cabinet du directeur, tandis que l'autre correspond à l'office ou à l'atelier dans lequel on a des ordres à transmettre. On a soin de terminer le tube à ses deux bouts par deux embouchures en corne ; celui qui parle applique la bouche à l'une d'elles (fig. 111), tandis que celui qui écoute applique l'oreille à l'autre.

155. **Porte-voix.** — Le *porte-voix*, ainsi que son nom l'indique,



Fig. 113. — Cornet acoustique.

est un instrument qui sert à transmettre la voix à de grandes distances. Il se compose d'un tube conique, en fer-blanc, terminé par une partie évasée qu'on nomme le *pavillon;* à l'autre extrémité est l'embouchure. Les officiers de marine font en mer un fréquent usage de cet instrument, à l'aide duquel la voix surmonte le bruit des vagues et permet ainsi le commandement des manœuvres au milieu des plus violentes tempêtes (fig. 112). D'après le père Kircher, savant jésuite allemand, mort à Rome en 1680, le porte-voix était connu d'Alexandre le Grand, qui s'en servait pour commander ses armées.

On a longtemps expliqué l'effet du porte-voix par une suite de réflexions successives des ondes sonores sur ses parois intérieures, réflexions en vertu desquelles la voix ne se transmettrait que dans

la direction de l'instrument; or, celui-ci propageant, au contraire, la voix dans toutes les directions, son effet doit plutôt être attribué à un renforcement de la voix occasionné par la colonne d'air qui est dans le tube, laquelle entre elle-même en vibration en même temps qu'on parle à l'embouchure.

156. **Cornet acoustique.** — Le *cornet acoustique* dont font usage les personnes qui ont l'oreille *dure*, n'est autre chose qu'un porte-voix renversé. Ici, la partie évasée est tournée vers la personne qui parle, tandis que le sommet du cône est introduit dans l'oreille (fig. 113). Les ondes se trouvant ainsi concentrées dans le canal auditif agissent plus fortement sur le tympan.

Chez l'homme et chez beaucoup d'animaux, le pavillon de l'oreille est un véritable cornet acoustique destiné à recevoir les ondes sonores. La plupart des quadrupèdes ont cette partie de l'organe auditif remarquable par sa longueur et sa mobilité, ce qui le rend plus propre à faire reconnaître à l'animal de quel côté vient le son.

CHAPITRE II.

SON MUSICAL, THÉORIE PHYSIQUE DE LA MUSIQUE.

157. **Différence entre le son musical et le bruit.** — Le *son musical* est celui qui résulte d'une suite de vibrations continues et isochrones, c'est-à-dire d'égale durée. Il a une valeur musicale que l'oreille peut apprécier et comparer à celle d'autres sons. Le bruit, au contraire, est un son isolé trop bref pour que l'oreille puisse y reconnaître une valeur musicale; tels sont, par exemple, le claquement d'un fouet, l'explosion d'une arme à feu; ou bien, c'est un mélange confus de plusieurs sons discordants, comme le roulement du tonnerre, le mugissement des vagues.

158. **Sons graves et sons aigus.** — Il est dans le son une qualité, la *hauteur*, qui dépend du nombre de vibrations accomplies par le corps sonore dans un temps donné. Par exemple, qu'une corde exécute 128 vibrations par seconde, tandis qu'une deuxième corde, en tout identique à la première, en fait 160 dans le même temps, les deux sons qu'elles font entendre sont tout à fait diffé-

rents. Le premier est plus bas ou plus *grave*, le second plus haut ou plus *aigu*.

En genéral, on nomme *sons graves* ceux qui correspondent à un petit nombre de vibrations, et *sons aigus* ceux qui résultent d'un grand nombre de vibrations. Toutefois, la gravité ou l'acuité des sons n'est que relative : tel son grave comparativement à un autre, peut être aigu par rapport à un troisième. C'est une succession bien ordonnée et une combinaison heureuse de sons graves et de sons aigus qui constituent l'art de la musique.

159. **Limite des sons perceptibles.** — Savart, physicien célèbre par ses travaux sur l'acoustique, mort à Paris en 1841, a cherché quelle était la limite des sons les plus graves et les plus aigus que puisse percevoir l'oreille. A l'aide d'appareils inventés par lui pour ce genre de recherche, il a trouvé que la limite des sons les plus graves correspond à 16 vibrations complètes par seconde. Pour un nombre de vibrations moindre, tout son disparaît. Le même physicien a trouvé que la limite des sons les plus aigus est de 48000 vibrations par seconde. Entre ces deux limites, on voit quelle immense quantité de sons on peut obtenir. Toutefois, les sons usités en musique, surtout pour le chant, sont beaucoup plus restreints. En comparant la voix humaine au son d'instruments dans lesquels le nombre des vibrations était connu, on a trouvé que la voix de l'homme fait 190 vibrations par seconde pour les sons les plus graves, et 678 pour les sons les plus aigus. Chez les femmes, les sons les plus graves de la voix correspondent à 572 vibrations, et les plus aigus à 1606.

Deux sons correspondant à un même nombre de vibrations sont dits à l'*unisson*.

160. **Échelle musicale, gamme.** — Notre oreille ne distingue pas seulement, entre plusieurs sons donnés, lequel est le plus grave ou le plus aigu, mais elle peut encore apprécier les rapports qui existent entre les nombres de vibrations correspondant à chacun de ces sons; non pas que nous puissions reconnaître précisément si pour un son leur nombre est deux, trois fois plus grand que pour un autre; mais toutes les fois que les nombres de vibrations de deux sons successifs ou simultanés sont dans un rapport simple, ces sons excitent sur nous une impression agréable, qui varie avec

le rapport des vibrations des deux sons et que l'oreille sait très-bien reconnaître. De là résulte une série de sons caractérisés par des rapports qui ont leur origine dans la nature même de notre organisation, et qui constituent ce qu'on appelle l'*échelle musicale.*

Dans cette série, les sons se reproduisant dans le même ordre par période de sept, chaque période se désigne sous le nom de *gamme*, et les sept sons ou *notes* de chaque gamme, par les noms *ut*, *ré*, *mi*, *fa*, *sol*, *la*, *si*. Les six premiers noms *ut*, *ré*, *mi*.... sont les premières syllabes des six premiers vers de l'hymne qu'on chante pour la fête de saint Jean, à Rome. Le nom *si* n'a été donné que plus tard à la septième note. Quant au mot *gamme,* il vient de *gamma*, nom de la troisième lettre de l'alphabet grec, parce que Guido d'Arezzo qui, le premier, dans le XIe siècle, convint de représenter les notes par des points placés sur des lignes parallèles, désignait ces lignes par des lettres et avait choisi la lettre *gamma* pour figurer la première ligne.

161. **Intervalles, accords.** — On appelle *intervalle* le rapport d'un son à un autre, c'est-à-dire le rapport entre les nombres de vibrations qui produisent ces sons.

L'intervalle entre deux notes consécutives de la gamme se nomme une *seconde;* tels sont les intervalles de *ut* à *ré*, de *ré* à *mi*, de *mi* à *fa*, et ainsi de suite.

Si, entre les notes que l'on compare entre elles, il existe une, deux, trois, quatre, cinq ou six notes intermédiaires, les intervalles se désignent sous les noms de *tierce*, *quarte*, *quinte*, *sixte*, *septième* et *octave*. Par exemple, le rapport ou intervalle de *ut* à *mi* est une tierce; celui de *ut* à *fa*, une quarte; celui de *ut* à *sol*, une quinte; de *ut* à *la*, une sixte; de *ut* à *si*, une septième; et, enfin, l'intervalle de l'*ut* d'une première gamme à l'*ut* de la gamme suivante est une octave.

On nomme *accord* la coexistence de plusieurs sons. Lorsque l'oreille peut découvrir sans fatigue le rapport entre deux sons, ce qui arrive toutes les fois que ce rapport est simple, l'accord ou la coexistence de ces deux sons forme une *consonnance;* mais si les nombres de vibrations sont dans un rapport compliqué, l'oreille en est péniblement affectée, et on dit qu'il y a *dissonance*.

L'accord le plus simple est l'unisson, dans lequel les nombres de vibrations sont égaux; vient ensuite l'octave dans laquelle le nombre des vibrations d'un son est double du nombre des vibrations de l'autre; puis la quinte dont le rapport des sons est de 3 à 2; la quarte dont le rapport des sons est de 4 à 3; et enfin, la tierce dont le rapport est de 5 à 4.

On donne le nom d'*accord parfait* à trois sons simultanés tels

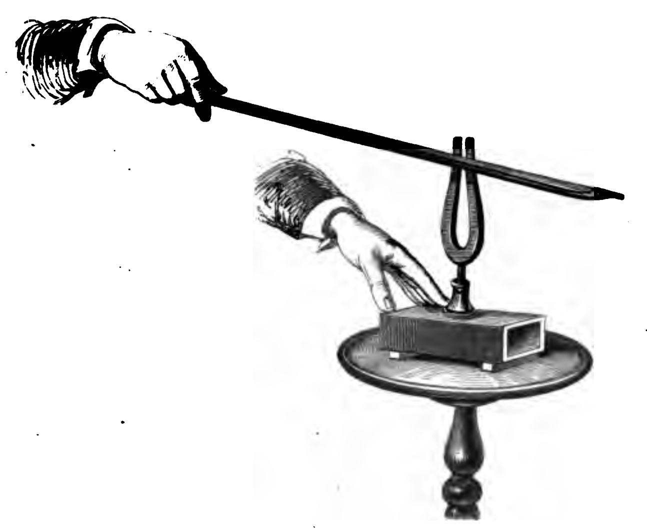


Fig. 114. — Diapason.

que les nombres de vibrations qui les produisent sont entre eux comme les nombres 4, 5 et 6. Par exemple, les trois notes ***ut***, ***mi***, ***sol***, forment un accord parfait; il en est de même de ***sol***, ***si***, ***ré***. Ce sont ces accords qui produisent sur l'oreille la sensation musicale la plus agréable.

162. **Diapason.** — Le *diapason* est un petit instrument qui sert à accorder et à mettre au ton les instruments de musique à sons fixes, comme les pianos. Composé d'une lame d'acier recourbée sur elle-même, comme le montre la figure 114, il est monté sur une petite caisse de bois, ouverte à une extrémité et destinée à ren-

forcer le son, qui autrement serait très-faible. On fait résonner le diapason en passant dessus un archet, ou en écartant ses deux branches au moyen d'un cylindre de bois ou de fer qu'on interpose entre elles et qu'on relève ensuite brusquement. Une fois écartées de leur position d'équilibre, les deux lames se mettent à vibrer en rendant un son qui est constant pour chaque diapason. Le son que donne ordinairement le diapason est le *la* correspondant à 856 vibrations simples.

CHAPITRE III.

VIBRATIONS TRANSVERSALES DES CORDES, INSTRUMENTS A CORDES.

163. **Vibrations transversales des cordes.** — On a déjà vu (144) que lorsqu'une corde élastique, tendue à ses extrémités, est écartée de sa position d'équilibre, elle y revient progressivement, aussitôt qu'elle est libre, en exécutant une série de vibrations qui produisent un son. Les cordes dont on fait usage en musique sont ordinairement faites avec des boyaux d'agneau ou de mouton. On fait vibrer ces cordes avec un archet, comme lorsqu'on joue du violon ou de la basse; ou bien en les pinçant entre les doigts, ainsi qu'on le fait pour la guitare et pour la harpe; ou enfin, par percussion, à l'aide de petits marteaux, comme dans le piano. Les vibrations obtenues par ces différents procédés, sont dites *transversales* pour les distinguer d'une autre espèce de vibrations qui se produisent dans le sens de la longueur des cordes, et que, pour cette raison, on nomme *vibrations longitudinales*. Ces dernières n'ayant point d'application en musique, il est inutile de nous en occuper ici.

164. **Lois des vibrations transversales des cordes.** — Le nombre des vibrations transversales d'une corde, dans un temps donné, en une seconde par exemple, et, par suite, le son qu'elle rend, varient avec sa longueur, avec sa grosseur, avec sa tension et avec sa densité, d'après les lois suivantes :

1° A tension égale, *le nombre des vibrations d'une corde est en raison inverse de sa longueur ;* c'est-à-dire qu'une corde faisant, par exemple, 18 vibrations, en fera 36, si on la rend deux fois plus courte ; 54, si elle devient trois fois moindre, et ainsi de suite. Cette propriété des cordes est utilisée dans le violon, dans la basse ; en effet, dans ces instruments, en appliquant le doigt sur une corde, on en réduit à volonté la longueur, et on augmente ainsi le nombre des vibrations, ce qui élève le ton.

2° A tension et à longueur égales, *le nombre des vibrations d'une corde est en raison inverse de sa grosseur ;* c'est-à-dire que plus une corde est mince, plus le nombre de ses vibrations est grand, et plus le son qu'elle rend est aigu. Par exemple, dans le violon, la chanterelle, qui est la corde la plus mince, fait un nombre de vibrations double de celui que ferait une corde deux fois plus grosse, c'est-à-dire d'un diamètre deux fois plus fort.

3° A longueur et à grosseur égales, la tension d'une corde augmentant, *le nombre des vibrations croît comme la racine carrée de la tension ;* c'est-à-dire que pour une tension quatre fois plus grande, le nombre des vibrations est seulement doublé ; pour une tension neuf fois plus grande, ce nombre est triplé, et ainsi de suite. De là le moyen de faire rendre à une corde des sons plus ou moins graves ou aigus, en la tendant à l'aide de chevilles, comme cela se pratique dans les instruments à cordes.

4° Enfin, toutes choses égales d'ailleurs, *le nombre des vibrations est en raison inverse de la racine carrée de la densité des cordes.* Par suite, plus les cordes sont denses, moins elles vibrent facilement et plus les sons qu'elles rendent sont graves.

D'après les lois qui précèdent, on conçoit combien il est facile de faire varier le nombre des vibrations des cordes, et de leur faire rendre une extrême variété de sons, depuis les plus graves jusqu'aux plus aigus usités en musique.

165. **Vérification des lois des vibrations des cordes, sonomètre.** — Les lois des vibrations des cordes se vérifient au moyen du *sonomètre*, dont l'invention est attribuée à Pythagore, environ l'an 600 avant J.-C., et qui consiste en une caisse de bois blanc, de la longueur d'un mètre vingt centimètres environ (fig. 115). Sur cette caisse sont deux chevalets fixes A et B, et un chevalet mobile D.

Sur ces chevalets passent deux cordes CD et AB, fixées solidement par un bout, et s'enroulant sur des poulies, à l'autre extrémité, où elles sont tendues par des poids P. Cela posé, les deux cordes étant identiques et tendues par des poids égaux, mais le chevalet D divisant la première en deux parties égales, on trouve que le son rendu par la moitié CD, lorsqu'on la fait vibrer, est l'octave aiguë du son rendu par la corde entière AB, ce qui montre que le nombre des vibrations est double, et vérifie la première loi.

Pour vérifier la seconde loi, on supprime le chevalet D, et pre-

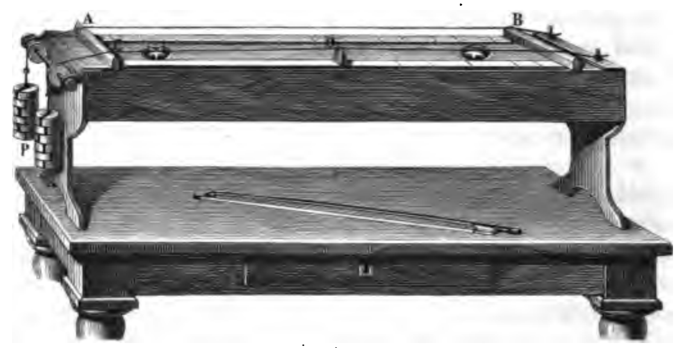


Fig. 115. — Sonomètre.

nant la corde AB double en grosseur de l'autre corde, mais tendues toutes les deux par des poids égaux, on trouve que le son rendu par la corde la plus mince est encore l'octave aiguë de celui rendu par AB; ce qui prouve que le nombre des vibrations est double.

Enfin, les deux cordes étant de même diamètre et de même longueur, si le poids qui tend l'une est quatre fois celui qui tend l'autre, le son rendu par la première corde est encore l'octave aiguë du son de la seconde, ce qui fait voir que le nombre des vibrations est doublé; pour un poids neuf fois plus grand, on obtient un son qui est l'octave aiguë de la quinte du son primitif, ce qui indique que le nombre des vibrations est triplé : la troisième loi est donc vérifiée.

Pour constater la quatrième loi, il suffit de faire usage de cordes

de différentes densités, également tendues et identiques en grosseur ainsi qu'en longueur.

166. **Instruments à cordes.** — Les instruments à cordes, tous fondés sur les lois des vibrations des cordes, se divisent en instruments à *sons fixes* et en instruments à *sons variables*.

Les instruments à sons fixes, comme le piano, la harpe, la guitare, la vielle, ont une corde pour chaque note, ou bien leur manche est divisé par des sillets un peu saillants, de manière qu'en plaçant un doigt entre deux de ces derniers, la corde se raccourcit d'une quantité fixe en s'appuyant sur les sillets, et rend ainsi un son dont la justesse est indépendante du talent de l'exécutant. Les sillets sont espacés de manière à varier la hauteur du son de demi-ton en demi-ton.

Dans les instruments à sons variables, au contraire, les cordes sont très-peu nombreuses, mais on en change la longueur à volonté au moyen du doigté. Tels sont le violon, l'alto, la basse ou violoncelle, et la contre-basse. La contre-basse n'a que trois cordes, les autres instruments en ont chacun quatre. Tous sont garnis de cordes de boyaux, mises en vibration par un archet. C'est en appuyant sur ces cordes avec un doigt, qu'on les raccourcit à volonté et qu'on élève le ton. Tous ces instruments sont difficiles à bien jouer et exigent une grande justesse d'oreille; mais entre les mains d'artistes habiles, ils produisent des effets prodigieux. Ils sont depuis bien des années l'âme des orchestres, et les plus beaux morceaux de musique ont été composés pour eux.

CHAPITRE IV.

TUYAUX SONORES ET INSTRUMENTS A VENT.

167. **Production du son dans les tuyaux sonores.** — On nomme *tuyaux sonores* des tubes creux, dans lesquels on produit des sons en faisant vibrer la colonne d'air qui y est contenue. Dans la production du son, telle que nous l'avons considérée jusqu'ici, le corps sonore était toujours un corps solide élastique dont les vibrations

se transmettaient à l'air, celui-ci n'étant que le véhicule du son; or, il n'en est plus ainsi dans les tuyaux sonores, où le corps vibrant est la colonne d'air même qu'ils renferment, et non leurs parois. En effet, le son ne dépend pas de la matière de ces tuyaux, mais seulement de leurs dimensions et du mode d'ébranlement de l'air.

Si l'on ne faisait que souffler dans les tuyaux, il n'y aurait pas de son, mais seulement un mouvement progressif continu de l'air. Pour qu'un son se produise, il faut, par un moyen quelconque, exciter dans l'air une succession rapide de condensations et de raréfactions, qui se propagent ensuite à toute la colonne d'air contenue dans le tuyau. De là, la nécessité de donner à l'*embouchure*, c'est-à-dire à l'extrémité du tuyau par laquelle arrive l'air, une forme convenable pour que celui-ci ne puisse entrer que par intermittence et non d'une manière continue. D'après la disposition adoptée pour mettre ainsi l'air en vibration, les tuyaux sonores se divisent en ***tuyaux à bouche*** et en ***tuyaux à anche***.

168. **Tuyaux à bouche.** — Dans les tuyaux à bouche toutes les parties de l'embouchure sont fixes. Ces tuyaux sont de bois ou de métal, rectangulaires ou cylindriques, et toujours d'une grande longueur par rapport à leur diamètre. La figure 116 représente un tuyau à bouche, en bois, de forme rectangulaire, et la figure 117 en montre une coupe longitudinale, qui permet de voir les détails intérieurs. Dans ce tuyau, la partie inférieure P, par laquelle arrive l'air, se nomme le ***pied***. A sa sortie du pied, l'air passe dans une fente étroite *i* qu'on appelle la ***lumière***. En regard de celle-ci, est pratiquée, dans la paroi opposée, une ouverture transversale qui est la ***bouche;*** son bord *a*, taillé en biseau, est la ***lèvre supérieure***, et le bord *b*, la ***lèvre inférieure***.

Cela posé, le courant d'air qui passe par la lumière se brise contre le biseau de la lèvre supérieure, s'y comprime, et, par un effet d'élasticité, réagit sur le courant qui continue d'arriver et l'arrête; mais cet arrêt n'a lieu que pendant un intervalle de temps très-court, parce que l'air s'échappant par la bouche, le courant qui vient du pied reprend aussitôt, et ainsi de suite pendant tout le temps qu'on fait arriver l'air. De là résultent des pulsations qui se transmettent à l'air dans l'intérieur du tuyau, et qui sont d'au-

tant plus rapides que la vitesse du courant est plus grande, et que la lèvre supérieure est plus rapprochée de la lumière.

L'embouchure que nous venons de décrire est employée dans les tuyaux d'orgue. La figure 118 représente l'embouchure d'un

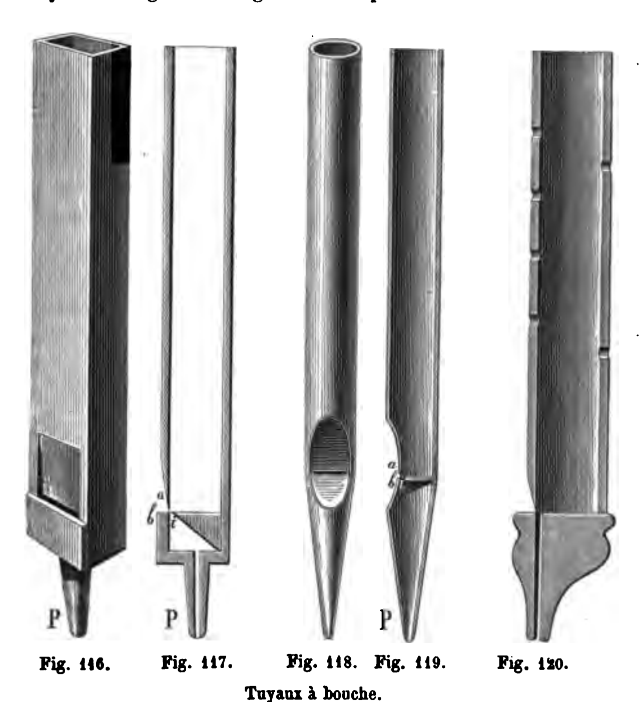


Fig. 116. Fig. 117. Fig. 118. Fig. 119. Fig. 120.

Tuyaux à bouche.

tuyau cylindrique très en usage dans les jeux d'orgue, et la figure 119 en montre une coupe longitudinale. Les mêmes lettres indiquent les mêmes pieces que dans la figure 117. La figure 120 représente l'embouchure du sifflet et du flageolet, laquelle a beaucoup de rapport avec les précédentes. Dans la flûte traversière, l'embouchure consiste en une simple ouverture circulaire pratiquée latéralement dans le tuyau. C'est par la disposition que le joueur de flûte donne à ses lèvres, que le courant d'air vient se

briser contre les bords de cette ouverture. Il en est de même pour la flûte de Pan, et pour une clef forée avec laquelle on siffle.

169. **Tuyaux à anche.** — Dans ces tuyaux, la colonne d'air est ébranlée à l'aide de lames élastiques qu'on nomme *anches*, et qui se divisent en anches battantes et en anches libres.

Anche battante. — Cette anche se compose d'une pièce de bois ou de métal *a* (fig. 122), qu'on nomme la *rigole,* et qui est creusée en forme de cuiller dans le sens de sa longueur. Elle est fixée à une espèce de bouchon K percé d'un trou, qui fait communiquer la cavité de la rigole avec un long tuyau T. La rigole est recouverte d'une lame de laiton *l*, qu'on nomme la *languette*. Celle-ci, dans sa position ordinaire, est légèrement écartée des bords de la rigole, mais étant très-flexible, elle peut s'en rapprocher facilement et la fermer. Enfin, un fil de fer *br*, qu'on désigne sous le nom de *rasette*, s'applique, par sa partie inférieure, qui est recourbée, sur la languette, et règle son écartement de la rigole. En enfonçant plus ou moins la rasette, on raccourcit ou on allonge la partie vibrante de la languette, ce qui permet d'augmenter ou de diminuer le nombre de ses vibrations.

L'anche est adaptée au haut d'un tuyau rectangulaire KN (fig. 121), qui est le *porte-vent.* Ce tuyau est fermé de toute part, excepté à son pied qu'on fixe sur le sommier d'une soufflerie qui sera décrite ci-après (fig. 124). Dans les cours de physique, pour laisser voir les vibrations de la languette, les parois du porte-vent, dans la partie qui correspond à l'anche, sont en verre; c'est cette disposition qui est représentée dans la figure 121.

Cela posé, lorsqu'on fait arriver l'air dans le porte-vent, il passe d'abord entre la languette et la rigole pour s'échapper par le tuyau T; mais la vitesse du courant s'accélérant, la languette vient frapper les bords de la rigole, et la fermant complétement, le courant ne passe plus. Or, en vertu de son élasticité, la languette revient sur elle-même; puis elle est entraînée de nouveau aussitôt que le courant passe, et ainsi de suite, en sorte que l'air ne passant que par intermittence du porte-vent dans le tuyau T, il se produit dans celui-ci la même série de pulsations que dans les tuyaux à bouche; d'où résulte un son d'autant plus élevé que le courant d'air est plus rapide.

Anche libre. — Grenié, en 1810, a inventé une espèce d'anche qu'on nomme ***anche libre***, parce que la languette, au lieu de battre sur les bords de la rigole, comme dans l'anche décrite ci-dessus, entre dans la rigole en rasant ses bords de manière à osciller en

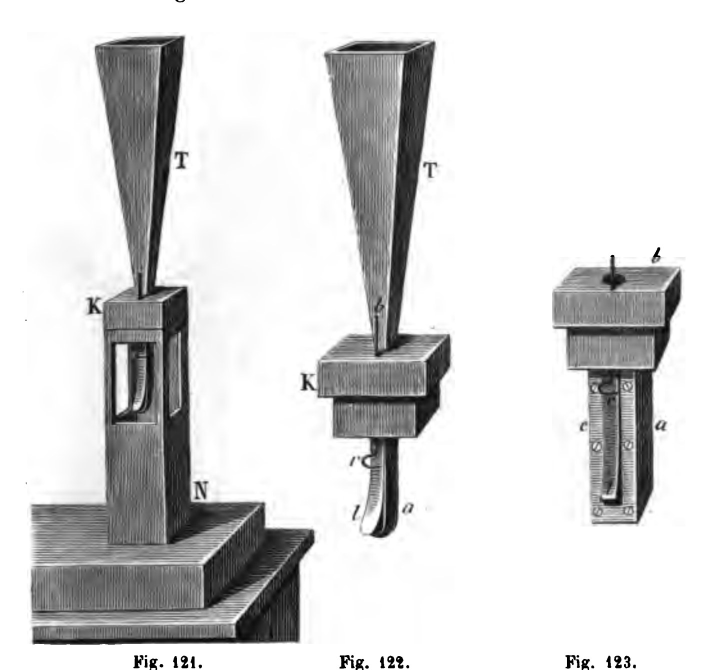


Fig. 121. Fig. 122. Fig. 123.

Tuyaux à anches.

dedans et en dehors. La figure 123 représente une anche de cette sorte. Ici la rigole consiste en une petite caisse de bois *ab*, dont la paroi antérieure est une plaque de laiton. Au milieu de celle-ci est une ouverture longitudinale dans l'intérieur de laquelle est la languette *l*, qui peut s'infléchir librement en avant et en arrière pour livrer passage au courant d'air qu'elle arrête chaque fois qu'elle rase les bords de la fente. Une rasette *r* sert encore à régler la longueur de la partie vibrante de la languette. Enfin, cette anche

est adaptée à un porte-vent identique à celui de la figure 121.

170. **Soufflerie.** — Pour faire *parler* les tuyaux, soit à bouche, soit à anche, on en fixe le pied, comme le montre la figure 124, dans des ouvertures pratiquées sur le *sommier*, ou caisse, d'une



Fig. 124. — Soufflerie.

forte soufflerie qu'on fait marcher à l'aide d'une pédale. L'air refoulé par le soufflet S se rend dans un réservoir R, en cuir; là, comprimé par deux plaques de plomb qui chargent ce réservoir, l'air passe, par un tube A, dans le sommier, où il se distribue aux tuyaux. Pour cela, dans l'intérieur du sommier, sont des soupapes qui ferment les orifices sur lesquels s'adaptent les tuyaux; en appuyant sur des touches placées en avant de ces derniers, les soupapes s'ouvrent et laissent passer l'air.

171. Instruments à vent. — Les instruments à vent sont des tubes droits ou courbes dont on tire des sons au moyen d'un courant d'air qu'on dirige dedans. Tous ces tubes ont une ouverture par laquelle s'introduit l'air : c'est d'après la forme de cette ouverture que les instruments à vent se divisent en instruments à bouche, instruments à anche et instruments à bocal.

Les instruments à bouche sont la flûte de Pan, le galoubet, le flageolet et la flûte traversière. Les principaux instruments à anche sont la clarinette, le hautbois, le cor anglais et le basson.

L'orgue, utilisé surtout dans les églises, est formé d'un système de tuyaux, les uns à bouche, les autres à anche. Le courant d'air qui vient agir sur ces tuyaux pour les faire parler est fourni par plusieurs soufflets. De la soufflerie, l'air se rend dans le sommier, d'où il passe dans tel ou tel tuyau, au moyen de soupapes que l'exécutant fait ouvrir en agissant sur des touches à bascule, semblables à celles du piano. Comme dans cet instrument, les touches sont disposées parallèlement, et leur ensemble prend le nom de *clavier*. Les orgues riches ont plusieurs claviers disposés en gradins.

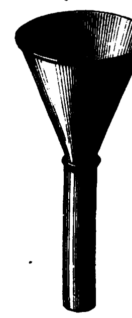


Fig. 125. — Embouchure du cor.

On a dit de l'orgue qu'il était le roi des instruments ; il l'emporte en effet sur tous les autres par la richesse, la puissance et la variété de ses moyens. Les orgues paraissent nous être venues d'Orient, mais on n'en connaît pas l'inventeur. Ce qu'on sait de plus certain, c'est que dans l'assemblée de Compiègne, tenue en 757, le roi Pepin reçut les ambassadeurs de l'empereur Constantin Copronyme, qui, entre autres présents, lui apportèrent des orgues. Tous les historiens sont d'accord pour dire que ce furent les premières qu'on vit en France.

Instruments à bocal. — Dans ces instruments, l'anche est supprimée ; ce sont les lèvres de l'artiste qui en tiennent lieu en vibrant dans un tube conique (fig. 125) qu'on nomme *bocal* ou embouchure, lequel est terminé par un tube d'un plus petit diamètre qui s'adapte à l'instrument. C'est en serrant et en tendant les lèvres plus ou moins qu'on fait varier le nombre des vibrations.

Les principaux instruments à bocal sont le *cor*, la *trompette*, le *bugle*, le *trombone* et le *cornet à piston*. Ces instruments, qui sont en laiton, vont en s'élargissant et se terminent par une partie très-évasée qu'on nomme le *pavillon*. C'est à celui-ci qu'est dû le son éclatant des instruments que nous venons de nommer, beaucoup plus qu'à la matière dont leurs parois sont formées. Le son que rend le cor de chasse a un éclat spécial qui s'entend à plusieurs lieues par un temps calme; mais cet instrument n'est propre qu'à jouer des fanfares, parce qu'il ne peut exécuter une gamme complète.

LIVRE V

DU CALORIQUE.

CHAPITRE PREMIER.

EFFETS GÉNÉRAUX DU CALORIQUE, THERMOMÈTRES.

172. Hypothèses sur la cause de la chaleur, calorique. — Les sensations de chaleur et de froid nous sont familières, et chacun a observé que le même principe qui fait naître en nous ces sensations exerce aussi son action sur les corps inertes. Par exemple, un corps quelconque, placé devant un foyer, s'échauffe de plus en plus ; écarté de ce même foyer, il se refroidit. Or, ce n'est pas seulement sa surface qui s'échauffe et se refroidit ainsi, mais toute sa masse, quelque dur que soit le corps. Le principe de la chaleur peut donc se transmettre à distance, pénétrer dans la matière des corps, s'y accumuler, puis s'en dégager ensuite pour aller échauffer d'autres corps.

C'est ici que, pour remonter à la cause des phénomènes dépendant de la chaleur, les physiciens ont admis l'existence des fluides impondérables et incoercibles dont nous avons eu déjà occasion de parler (6), et que, divisés d'opinion, les uns ont adopté l'*hypothèse de l'émission*, les autres *celle des ondulations ;* hypothèses qu'on verra reparaître dans l'étude de la lumière.

Dans l'hypothèse de l'émission, soutenue par Newton et par les physiciens de son école, on attribue la cause de la chaleur à un fluide éminemment subtil, impondérable et incoercible, émis dans toutes les directions par les corps chauds ; en sorte que c'est ce fluide qui, tantôt s'accumulant dans les corps, tantôt les abandonnant, donne naissance à tous les phénomènes de chaleur et de froid. Cette matière invisible, impalpable, qui fait rougir le fer,

fond les métaux, met les corps en ignition, a d'abord reçu les noms de ***matière ignée***, de ***matière du feu;*** mais lors de la réforme du langage scientifique, Lavoisier, célèbre chimiste et physicien de la fin du siècle dernier, lui a donné le nom de ***calorique***, d'un mot latin qui veut dire ***chaleur***.

Dans l'hypothèse des ondulations, soutenue par Descartes, Huyghens et leurs disciples, on suppose aussi un fluide invisible, insaisissable, extrêmement subtil et élastique, qu'on nomme ***éther;*** mais ce fluide, au lieu d'être émis par les corps et de se transmettre de l'un à l'autre, est répandu dans tout l'univers, dans toutes les substances et même dans le vide le plus parfait. Cela posé, on admet que tous les phénomènes qui dépendent de la chaleur ont pour cause un mouvement vibratoire particulier des molécules des corps chauds, lequel mouvement se transmet à l'éther, qui le propage ensuite, avec une vitesse presque infinie, sous forme d'ondulations, de la même manière que l'air propage le son : en sorte que c'est à l'intensité plus ou moins grande des vibrations de l'éther que sont dus tous les degrés de chaleur et de froid.

Ces deux théories ont longtemps divisé les physiciens; mais aujourd'hui, vu l'analogie qui existe entre les phénomènes de la chaleur et ceux de la lumière, la théorie des ondulations étant celle qui a prévalu pour ce dernier agent physique, c'est aussi celle qui est généralement adoptée dans la chaleur. Toutefois, l'exposition des phénomènes se présentant sous une forme plus saisissable dans la théorie de l'émission, et la transmission ou l'accumulation d'un fluide calorifique étant plus facile à se représenter que ses ondulations, on s'exprime, en général, conformément à l'hypothèse de l'émission. Nous continuerons donc à donner à la cause de la chaleur, quelle qu'elle soit, le nom de ***calorique***, et nous dirons d'un corps qui s'échauffe ou se refroidit, qu'il absorbe ou perd du calorique.

173. **Importance de l'étude du calorique.** — Par les applications nombreuses que nous présente la chaleur, par l'influence bienfaisante qu'elle exerce sur tous les êtres de la nature, aucune des branches de la physique ne mérite autant de fixer notre attention que celle qui traite du calorique. En effet, non-seulement c'est le

calorique émis de nos foyers qui sert à la préparation dé nos ali ments, et qui, pendant les longs hivers de nos climats, supplée, pour nous, à l'absence de la chaleur solaire; mais, dans l'industrie, c'est à l'aide de cet agent puissant que l'homme extrait des minerais les métaux qu'ils contiennent, les affine et les façonne à son usage. C'est cet agent qui sert à la préparation d'une foule de produits utilisés dans les arts, tels que le gaz d'éclairage, la chaux à bâtir, le plâtre, le verre, la potasse, etc., etc.; c'est lui encore qui crée partout une force motrice si puissante en transformant l'eau en vapeur. Enfin, nous n'en finirions pas si nous voulions mentionner ici toutes les grandes applications du calorique; qu'il nous suffise d'ajouter qu'il pénètre l'univers entier, anime toute la nature organisée, que sans lui les plantes et les animaux ne pourraient vivre, que les mers ne seraient qu'un immense banc de glace, et que tout notre globe serait plongé dans un engourdissement absolu.

Sous le nom de *feu*, le calorique a excité de tout temps l'admiration du genre humain, et presque tous les peuples primitifs l'ont divinisé. Les Perses et les Péruviens saluaient le soleil levant, comme le symbole du feu le plus pur. Le feu sacré qu'entretenaient à Rome les prêtresses de Vesta, celui qui brûlait sans cesse dans le temple de Delphes, le culte de Vulcain, nous rappellent la déification du feu. Prométhée étant, d'après la fable, le premier inventeur qui enseigna aux hommes l'usage du feu, passa pour l'avoir dérobé au ciel, et sous l'allégorie d'un vautour qui lui rongeait le foie toujours renaissant, les anciens figuraient le désir de savoir qui le consumait sans cesse.

174. Effets généraux du calorique. — On a déjà vu (4) qu'en s'accumulant dans les corps, le calorique a pour effet général de faire naître entre leurs molécules une force répulsive opposée à l'attraction moléculaire. Obéissant à cette force, les molécules s'écartent, les pores augmentent, et de là résulte un accroissement de volume qu'on désigne sous le nom de *dilatation*. Cette dilatation s'observant également dans les solides, dans les liquides et dans les gaz, la *dilatabilité* des corps par la chaleur est une nouvelle propriété générale à ajouter à celles déjà étudiées (7).

L'action du calorique sur les corps solides n'est pas seulement

de les dilater; en outre, lorsqu'il s'y trouve accumulé en quantité suffisante, ces corps perdent d'abord de leur solidité, ils deviennent mous; puis la quantité de chaleur augmentant encore, la force répulsive due au calorique finit par faire équilibre à l'attraction moléculaire, et alors les corps affectent l'état liquide. La cire, les résines, le soufre, passent ainsi facilement de l'état solide à l'état liquide. La chaleur produit donc ici, dans les corps solides, un changement d'état. Or, sous l'influence de cet agent, un phénomène semblable se produit dans les liquides; en effet, lorsqu'on les chauffe, ils se dilatent d'abord; mais chauffés davantage, l'attraction moléculaire est vaincue par la force répulsive, et ces corps se transforment alors en fluides aériformes qu'on désigne sous le nom de *vapeurs*.

Si au lieu de s'accumuler dans les corps le calorique s'en dégage, si au lieu d'échauffement il y a refroidissement, des phénomènes inverses se produisent : les molécules se rapprochent, le volume des pores diminue, et, par suite, aussi celui des corps; ce qu'on exprime en disant qu'il y a *contraction*. Par le refroidissement, les vapeurs, perdant leur force élastique, reviennent à l'état liquide, et les liquides eux-mêmes repassent graduellement à l'état solide : par exemple, l'eau se transforme alors en glace, et le mercure devient dur comme du plomb.

En résumant ce qui précède, on voit donc que de l'accumulation ou de la perte de chaleur, il résulte dans les corps deux effets physiques : 1° des variations de volume, qui consistent en dilatations et en contractions; 2° des changements d'état, c'est-à-dire des transformations de solides en liquides, de liquides en vapeurs, ou réciproquement. Nous allons d'abord nous occuper des dilatations des solides, des liquides et des gaz, ensuite nous traiterons des changements d'état.

175. **Expériences qui démontrent la dilatation.** — Tous les corps sont dilatables par l'action de la chaleur, mais de quantités très-différentes. Les plus dilatables sont les gaz, après eux viennent les liquides, puis enfin les solides qui le sont toujours beaucoup moins. Dans les gaz et dans les liquides, il n'y a lieu de considérer que des accroissements en volume; mais dans les solides on distingue deux sortes de dilatations, l'une dans le sens de la longueur, c'est

la *dilatation linéaire;* l'autre, en volume, c'est la *dilatation cubique.*

Pour rendre sensibles les dilatations linéaires, qui sont toujours très-faibles, on fait l'expérience représentée dans la figure 126. Une tige A, de fer ou de cuivre, traverse deux supports métalliques. En B elle est fixée solidement par une vis de pression, mais à son autre extrémité elle n'est retenue par aucun obstacle et peut

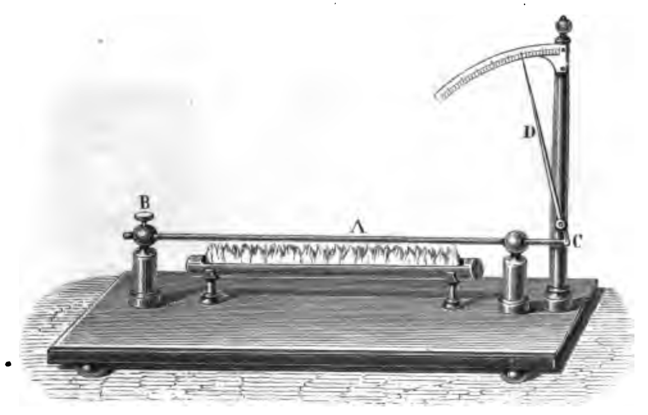


Fig. 126. — Dilatation linéaire.

s'allonger librement, en agissant, en C, sur le petit bras d'un levier dont le grand bras D tourne, comme une aiguille sur un cadran. Enfin, au-dessous de la tige A, est une tubulure de cuivre, dans laquelle on brûle de l'alcool. Or, la tige A s'échauffant ainsi très-fortement, on voit le grand bras de levier marcher de plusieurs degrés sur le cadran; ce qui montre qu'en C le petit bras de levier s'est lui-même légèrement déplacé, poussé par la tige A qui s'allonge. Selon que cette tige est en acier, en cuivre rouge, en laiton, etc., on remarque que le grand bras de levier se déplace inégalement, ce qui fait voir que les différents métaux ne se dilatent pas de la même quantité pour un même degré d'échauffement. On trouve ainsi que le cuivre jaune, ou laiton, se dilate beaucoup plus que le fer et l'acier.

Pour montrer la dilatation cubique des corps solides, on dispose l'expérience comme le montre la figure 127. On a un boulet **B**, en fonte, lequel, à la température ordinaire, passe librement dans un anneau de fer A supporté sur trois pieds. On place ce boulet dans un fourneau à dôme et on le chauffe jusqu'au rouge. Or, si on le pose alors sur l'anneau, comme le représente le dessin, on observe qu'il ne passe plus, ce qui prouve qu'il y a accroissement de volume. Ce n'est qu'en le laissant refroidir lentement que peu à peu



Fig. 127. — Dilatation cubique.

il revient à son volume primitif, ce qu'on reconnaît parce qu'il tombe en passant à travers l'anneau.

Quant aux liquides et aux gaz, qui sont beaucoup plus dilatables que les solides, leur dilatation est facile à constater. Pour les liquides, on prend une boule de verre à laquelle on soude un tube capillaire de même matière, comme le montre la figure 128, puis on remplit la boule et une portion du tube d'un liquide quelconque, ordinairement d'alcool coloré en rouge, ou de mercure. Or, lorsqu'on chauffe légèrement la boule, à la température de l'eau tiède par exemple, on voit la colonne liquide s'élever notablement dans le tube, soit de *a* jusqu'en *b*, ce qui indique une dilatation bien plus grande que dans les solides.

L'expérience se fait d'une manière analogue pour les gaz, mais comme ceux-ci sont encore bien plus dilatables que les liquides, on modifie l'appareil de la figure 128, en soudant à la boule de

verre un tube beaucoup plus long, et, pour cela, recourbé deux fois sur lui-même, comme le représente la figure 129. Un index de mercure *m* est d'avance introduit dans le tube, ce qui s'obtient en chauffant la boule, qui est pleine d'air, de manière qu'une portion de celui-ci se dégage par l'effet de la dilatation. Versant alors une gouttelette de mercure dans le petit entonnoir *a*, et laissant refroidir, l'air qui reste dans la boule et dans le tube se contracte, et la pression atmosphérique refoule la gouttelette jusqu'en *m*, par exemple. L'appareil étant ainsi disposé, si l'on tient la boule dans la main pendant quelques instants, l'air qu'elle renferme se dilate assez pour refouler l'index de mercure de *m* en *n*, ce qui montre une dilatation bien plus considérable que dans les liquides.

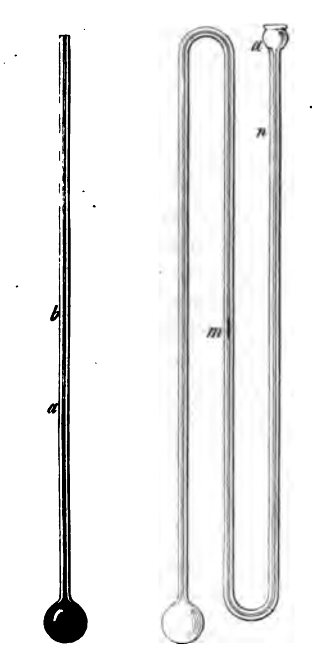


Fig. 128.— Dilatation des liquides. Fig. 129.— Dilatation des gaz.

D'après tout ce qui précède, on voit que l'effet général de la chaleur est de dilater tous les corps; toutefois, cela ne doit s'appliquer qu'aux substances qui, comme les métaux, le verre, n'absorbent pas dans leurs pores l'humidité de l'air. En effet, pour les corps susceptibles d'absorber l'eau, comme les bois, le papier, l'argile, l'élévation de température, en vaporisant le liquide et en le chassant des pores, occasionne un ***retrait*** plus ou moins considérable. C'est pour cela qu'une feuille de papier humide présentée au feu s'enroule du côté qu'elle est chauffée. De même, les tonneliers, pour courber les douves des barriques, les chauffent d'un seul côté, en allumant du feu dans l'intérieur de la barrique quand les douves ne sont encore qu'assemblées. La partie tournée vers le feu,

se desséchant, se contracte et se courbe du côté soumis à l'action de la chaleur.

DES THERMOMÈTRES.

176. **Température, thermomètre.** — La *température* d'un corps est le degré de chaleur qui se manifeste dans ce corps; s'il s'échauffe, on dit que sa température s'élève; s'il se refroidit, sa température baisse. Cela posé, tout instrument qui peut servir à évaluer les températures se nomme un *thermomètre*, de deux mots grecs qui signifient *mesure de la chaleur*. L'invention des thermomètres date de la fin du XVIe siècle, et est attribuée, par les uns, à Galilée, par les autres, à Drebbel, médecin hollandais.

Nos sens étant trop imparfaits pour nous servir à apprécier avec quelque précision les variations de température, on a dû avoir recours, pour les mesurer, aux effets mêmes de dilatation que le calorique produit dans les corps. Or, les solides, étant fort peu dilatables, ne peuvent servir qu'à mesurer de très-grandes variations de température; les gaz, au contraire, l'étant beaucoup, ne peuvent être utilisés que pour mesurer de très-faibles accroissements ou décroissements de chaleur. On a donc donné la préférence aux liquides pour la construction des thermomètres. Les seuls liquides en usage sont le mercure et l'alcool, et surtout le premier, dont la dilatation est beaucoup plus *régulière* que celle de l'alcool, c'est-à-dire que ses accroissements de volume approchent davantage d'être proportionnels aux quantités de chaleur. Nous allons d'abord nous occuper du thermomètre à mercure, ensuite nous traiterons du thermomètre à alcool.

177. **Construction du thermomètre à mercure.** — Le thermomètre à mercure est celui dont l'usage est le plus répandu et dont les indications sont les plus exactes. Il se compose d'un tube de verre capillaire soudé à une boule de même matière, comme le représente la figure 131. La boule et la partie inférieure du tube sont remplies de mercure. Or, vu le très-petit diamètre intérieur du tube, l'introduction du mercure dans l'instrument présente quelque difficulté. Pour faire cette opération, on commence par souder au haut du tube un petit entonnoir de verre, comme le

montre la figure 130. Versant ensuite dans l'entonnoir une certaine quantité de mercure, celui-ci ne passe pas d'abord, étant retenu par la résistance que lui présentent le petit diamètre du tube et la force élastique de l'air qui remplit la boule. Mais si l'on chauffe celle-ci légèrement sur des charbons incandescents ou à la flamme d'une lampe à alcool, l'air intérieur se dilate et sort en partie, en se dégageant en bulles à travers le mercure qui est dans l'entonnoir. Or, si on laisse alors refroidir quelques instants, l'air qui reste à l'intérieur se contracte, et sa force élastique diminuant, la pression atmosphérique qui pèse sur le mercure contenu dans l'entonnoir le force à passer dans la boule, où il tombe goutte à goutte. Toutefois, comme il y a encore de l'air dans la boule, elle ne se remplit pas tout à fait; mais en chauffant de nouveau et laissant ensuite refroidir, une nouvelle quantité de mercure pénètre dans l'instrument, et ainsi de suite jusqu'à ce qu'il n'y reste plus qu'un très-petit volume d'air. Pour l'expulser tout à fait, on est obligé de chauffer la boule jusqu'à ce que le mercure qu'elle contient entre en ébullition; les vapeurs mercurielles qui se dégagent entraînent enfin tout l'air qui restait, et en laissant refroidir, la boule et tout le tube se remplissent complétement. On enlève alors l'entonnoir en coupant le tube au moyen d'un simple trait qu'on trace dessus avec l'arête d'une lime triangulaire, puis on ferme l'extrémité du tube en la soudant à la lampe d'émailleur; on nomme ainsi une lampe à huile dont la flamme est

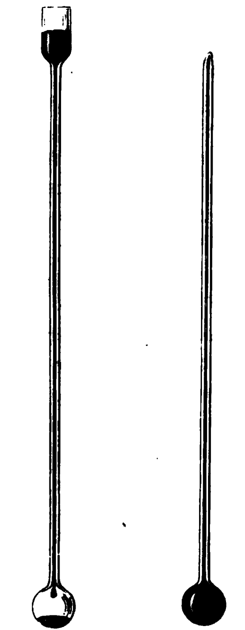


Fig. 130. — Remplissage du therm. Fig. 131. — Therm. non gradué.

traversée par un courant d'air rapide, qui l'active fortement et en élève beaucoup la température. Toutefois, avant de fermer le tube, il faut avoir soin de chauffer le thermomètre de manière à faire sortir assez de mercure pour qu'à la température ordinaire le tube ne soit rempli qu'au quart ou au tiers; sans cette précaution, le mercure, en se dilatant, briserait l'instrument. Le thermomètre est alors tel qu'il est représenté dans la figure 131; il ne reste plus qu'à le graduer.

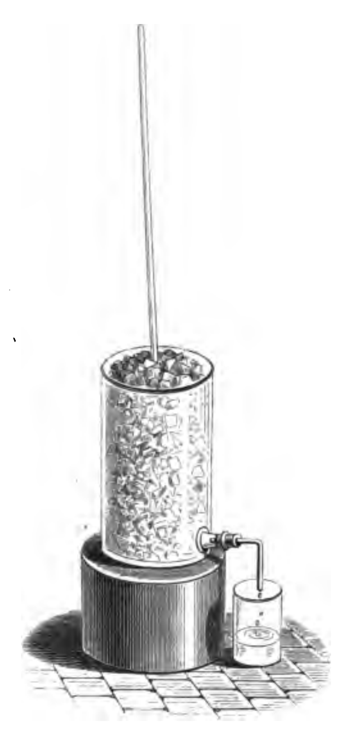


Fig. 132.— Détermination du zéro du therm.

178. Graduation du thermomètre. — Le thermomètre étant formé, comme on vient de le voir, d'une boule remplie de mercure et d'un tube très-capillaire soudé à cette boule, tube que nous désignerons désormais sous le nom de *tige*, toutes les fois que la température s'élève ou s'abaisse, le mercure de la boule se contractant ou se dilatant, on voit le liquide monter ou descendre dans la tige, et ce sont ces variations de hauteur qui servent à la mesure des températures; mais, pour cela, il est nécessaire de tracer le long de cette tige une échelle graduée qui donne le moyen de mesurer avec précision les dilatations et les contractions du mercure. Pour la graduation de cette échelle, on a adopté deux points fixes correspondant à des températures invariables et faciles à reproduire. Ces températures sont : l'une, celle de la glace fondante; l'autre, celle de l'eau bouillante. Ce choix est fondé sur ce que l'expérience a appris que la tempé-

rature à laquelle fond la glace est toujours rigoureusement la même, et qu'il en est encore ainsi pour la température à laquelle l'eau entre en ébullition, à la condition toutefois que cette eau soit distillée, c'est-à-dire parfaitement pure, qu'elle bouille dans un vase de métal et non de verre, enfin que la pression atmosphérique soit constamment égale à la hauteur barométrique 76 centimètres. Nous verrons en effet, en traitant de l'ébullition, que si l'une de ces conditions n'est pas remplie, l'eau cesse de bouillir à la même température.



Fig. 133. — Détermination du point 100 du thermomètre.

Cela posé, pour déterminer le premier point fixe, celui qui correspond à la glace fondante, on commence par coller une bande étroite de papier le long de la tige du thermomètre, puis on plonge celui-ci dans de la glace pilée, comme le montre la figure 132, en ayant soin de laisser écouler l'eau qui provient de la fusion de la glace. Après que le thermomètre est resté un certain temps dans la glace, vingt minutes au moins, on marque sur la bande de papier, au point correspondant au niveau du mercure, un petit trait au crayon ; c'est le premier point fixe.

Le second se détermine au moyen de l'appareil représenté dans la figure 133. C'est un vase de fer-blanc dont le couvercle est surmonté d'un long tube de même matière. Dans ce tube est le thermomètre, maintenu à sa partie supérieure par un bouchon de liége

dans lequel passe la tige. Cela posé, le vase de fer-blanc contient de l'eau qu'on chauffe jusqu'à l'ébullition ; les vapeurs qui se dégagent alors montent dans le grand tube, enveloppent tout le thermomètre, et se dégagent par deux tubulures latérales placées au haut de l'appareil. Ces vapeurs sont à la température de l'eau dont elles se dégagent, et on reconnaît que le thermomètre a atteint cette température, lorsque le mercure cesse de monter dans la tige; on marque alors au point où il s'arrête, un nouveau trait, qui représente le second point fixe.



Fig. 134. — Therm. à mercure avec échelle centigrade.

Les deux points fixes obtenus, on inscrit un zéro au premier, celui de la glace fondante, c'est-à-dire qu'il est l'origine de la graduation; puis au second, celui de l'eau bouillante, on écrit 100, et on partage enfin l'intervalle de 0 à 100 en cent parties égales qu'on nomme ***degrés***. On continue les divisions au-dessous du zéro et au-dessus du point 100 autant que le permet la longueur de la tige, et l'échelle est alors graduée. On la trace quelquefois sur le verre même de la tige du thermomètre, à l'aide d'un acide connu en chimie sous le nom d'***acide fluorhydrique***, lequel a la propriété d'attaquer le verre. L'échelle ainsi tracée sur verre est plus difficile à lire, mais elle a l'avantage

de ne pouvoir se déplacer et de conserver une longueur très-sensiblement constante, le verre étant fort peu dilatable. On trace aussi les échelles de thermomètre sur des plaques de métal, d'ivoire ou de bois qu'on fixe le long de la tige. La figure 134 représente un thermomètre à mercure monté sur ivoire; son échelle s'étend depuis 20 degrés au-dessous de zéro jusqu'à 110 degrés au-dessus.

Les degrés du thermomètre, comme ceux du cercle, s'indiquent par un petit zéro placé à droite et un peu au-dessus du nombre qui marque la température; par exemple, 25 degrés s'écrivent ainsi : 25°. Quant aux degrés au-dessus ou au-dessous de zéro, on les distingue en faisant précéder les premiers du signe *plus* (+), et les derniers du signe *moins* (—). On désignera donc la température de 20 degrés au-dessus de zéro par + 20°, et celle de 20 degrés au-dessous par — 20°.

179. **Différentes échelles thermométriques.** — Dans le thermomètre qui vient d'être décrit, l'intervalle entre les deux points fixes étant divisé en cent parties ou degrés, l'échelle a reçu le nom d'*échelle centigrade*. C'est celle qui est généralement usitée en France, et la seule dont il sera fait mention dans ce Traité; mais il en existe encore deux autres, l'*échelle de Réaumur* et l'*échelle de Fahrenheit*. Dans la première, adoptée en 1731 par Réaumur, physicien français, on choisit encore pour points fixes les températures de la glace fondante et de l'eau bouillante, et l'on marque toujours zéro au premier point; mais au second, au lieu de 100, on marque 80; puis on partage l'intervalle du 0 à 80 en 80 parties égales, qui sont les degrés du thermomètre Réaumur.

Fahrenheit, le même à qui est dû l'aréomètre (95), construisit, le premier, en 1714, l'échelle portant son nom, et dont l'usage est très-répandu dans l'Amérique du Nord, en Angleterre, en Russie et dans les Indes Orientales. Le point fixe supérieur de cette échelle correspond encore à la température de l'eau bouillante; mais au lieu de 100 on y marque 212. Quant au point fixe inférieur, il ne correspond plus à la température de la glace fondante, mais à un froid beaucoup plus intense, qu'on obtient en mélangeant des poids égaux de glace pilée et d'un sel connu dans le commerce sous le nom de *sel ammoniac*. Marquant zéro au point

où descend le mercure quand le thermomètre est plongé dans ce mélange réfrigérant, on partage enfin l'intervalle entre les deux points fixes en 212 parties égales, et l'échelle est graduée.

180. **Conversion des degrés Réaumur et des degrés Fahrenheit en degrés centigrades.** — Pour convertir des degrés Réaumur en degrés centigrades, remarquons que le même intervalle de la glace fondante à l'eau bouillante, qui est divisée en 80 degrés dans la première échelle, l'est en 100 dans la deuxième; d'où l'on voit que 80 degrés Réaumur équivalent à 100 degrés centigrades, et, par suite, qu'un seul degré Réaumur vaut 80 fois moins, c'est-à-dire $\frac{100}{80}$, ou $\frac{10}{8}$ en simplifiant la fraction, ou enfin $\frac{5}{4}$ en simplifiant encore; 1 degré Réaumur égale donc $\frac{5}{4}$ de degré centigrade. Par suite, s'il s'agit de convertir, par exemple, 32 degrés Réaumur en degrés centigrades, on dira: puisqu'un seul degré Réaumur vaut $\frac{5}{4}$ de degré centigrade, 32 degrés Réaumur valent 32 fois plus, c'est-à-dire $\frac{5}{4}$ multiplié par 32, ce qui donne pour produit 40 degrés centigrades. On voit donc que pour convertir des degrés Réaumur en degrés centigrades, il suffit de les multiplier par $\frac{5}{4}$.

Pour convertir des degrés Fahrenheit en degrés centigrades, on s'appuie sur cette propriété de l'échelle Fahrenheit, que son 32e degré se trouve juste correspondre au zéro de l'échelle centigrade; d'où il résulte que la portion de la tige qui, sur cette dernière échelle, comprend 100 degrés, en contient 212 moins 32, c'est-à-dire 180, sur l'échelle Fahrenheit. Cela posé, veut-on, par exemple, convertir 95 degrés Fahrenheit en degrés centigrades; comme ces derniers sont comptés à partir du point correspondant à la glace fondante, il faut, afin de faire partir du même point les degrés à convertir, en retrancher 32, d'après ce qui a été dit ci-dessus de la position relative des deux zéros. Retranchant donc 32 de 95, il reste 63. Or, puisqu'on vient de voir que 180 degrés Fahrenheit valent 100 degrés centigrades, un seul degré Fahrenheit vaut 180 fois moins, c'est-à-dire $\frac{100}{180}$, ou, en simplifiant, $\frac{5}{9}$ de degré centigrade; donc 63 degrés Fahrenheit valent enfin $\frac{5}{9}$ multiplié par 63, ce qui donne pour produit 35 degrés centigrades. D'où l'on voit que pour convertir en degrés centigrades des degrés Fahrenheit, on doit en retrancher 32, puis multiplier le reste par $\frac{5}{9}$.

181. **Thermomètre à alcool.** — Les thermomètres à alcool sont

entièrement semblables aux thermomètres à mercure; la seule différence est que la boule et la tige, au lieu de contenir du mercure, contiennent de l'alcool coloré en rouge avec une matière végétale nommée *orseille*, ce qui rend le liquide plus apparent. On gradue ces thermomètres en comparant leur marche, de degré en degré, à celle d'un thermomètre à mercure, afin de corriger l'erreur qui, autrement, résulterait de la dilatation irrégulière de l'alcool.

Quant à leur remplissage, il n'est pas nécessaire de souder un entonnoir à l'extrémité du tube; il suffit de chauffer légèrement la boule de manière à chasser une certaine quantité d'air, puis de renverser le tube en en plongeant l'extrémité ouverte dans l'alcool. L'air intérieur se contracte en se refroidissant et la pression atmosphérique fait monter l'alcool dans le tube et dans la boule. Celle-ci ne se remplit pas d'abord complétement, parce qu'il y est resté de l'air; mais en faisant bouillir l'alcool qui vient d'être introduit, ce liquide, qui est très-volatil, donne d'abondantes vapeurs, et celles-ci en se dégageant entraînent rapidement tout l'air qui est encore dans la boule; c'est alors que retournant le tube et plongeant de nouveau son extrémité dans l'alcool, l'instrument se remplit tout à fait. La construction s'achève ensuite absolument comme pour le thermomètre à mercure.

182. Choix à faire entre le thermomètre à mercure et le thermomètre à alcool. — C'est au thermomètre à mercure qu'on doit en général donner la préférence, parce que de tous les liquides c'est le mercure qui se dilate le plus régulièrement, c'est-à-dire dont les accroissements de volume correspondent mieux aux accroissements de chaleur. Toutefois, il est un cas où l'on est forcé de faire usage du thermomètre à alcool, c'est pour mesurer les très-basses températures. En effet, à 40 degrés au-dessous de zéro, le mercure se solidifie en une masse comparable à du plomb; par suite, à cette température et aux températures inférieures, le thermomètre à mercure ne peut plus fonctionner. Mais on peut alors avoir recours au thermomètre à alcool, car ce liquide ne se solidifie point par les plus grands froids connus, même à 80 degrés au-dessous de zéro.

Pour les hautes températures, le thermomètre à mercure est bien préférable, parce que ce liquide ne bout qu'à 350°, tandis que

l'alcool bout à 79°. En résumé, le thermomètre à mercure peut être employé de — 36° jusqu'à + 350°; nous disons — 36° seulement, parce qu'on a reconnu que de — 36° à — 40 le mercure se contracte irrégulièrement. Pour des températures supérieures à 360°, le thermomètre à mercure ne peut plus donner d'indications exactes, et d'ailleurs le verre ne tarderait pas à se ramollir.

183. **Conditions à observer pour consulter le thermomètre.** — Pour être exactes, les observations thermométriques doivent être faites dans de certaines conditions. Par exemple, pour prendre la température d'un bain, certaines personnes y plongent un instant un thermomètre, le retirent, puis le consultent ensuite. Mais en s'y prenant ainsi, le thermomètre se refroidit et accuse une température inférieure à celle du bain. C'est pendant qu'il est dans l'eau qu'on doit le consulter, et encore faut-il l'y laisser plonger assez longtemps pour qu'il en prenne exactement la température.

La bonne température d'un bain, en degrés centigrades, est de 32 à 33°; en degrés Réaumur, de 27°. Or, dans les établissements de bains de Paris, on fait encore usage de thermomètres de Réaumur; il en résulte que si l'on demande un bain à 33°, on vous en sert un à cette température, mais en degrés Réaumur; et comme 33° degrés Réaumur équivalent à un peu plus de 41 degrés centigrades, il en résulte que votre bain est beaucoup trop chaud. Du reste, il n'est pas rare que des médecins ordonnent un bain à une température déterminée, sans dire si elle est mesurée en degrés Réaumur ou en degrés centigrades; cependant, comme on vient de le voir, cette indication est nécessaire.

Lorsqu'il s'agit d'apprécier la température d'un appartement, on se contente ordinairement de suspendre un thermomètre à l'un des murs. Or, on peut avoir ainsi une erreur de plusieurs degrés. Si le mur communique avec l'extérieur, et surtout s'il regarde le nord, il sera, en général, plus froid que l'air de l'appartement et communiquera une température trop basse. Il peut encore arriver que ce mur se trouve chauffé par des tuyaux de cheminée et que, par suite, le thermomètre donne une température trop élevée. C'est pourquoi le seul moyen d'obtenir réellement le degré de chaleur de l'air dans un appartement, est de suspendre le thermomètre par un fil au milieu même de la pièce, loin de tout corps

qui puisse contribuer à l'échauffer ou à le refroidir. Il en est de même lorsqu'on veut avoir la température de l'atmosphère; le thermomètre doit être suspendu en plein air, à l'ombre, et non posé sur un objet quelconque ou suspendu contre un mur, comme le font ceux qui n'ont pas l'habitude de ces sortes d'observations.

184. **Thermomètres différentiels.** — On appelle ***thermomètres différentiels*** des thermomètres destinés à faire connaître non pas

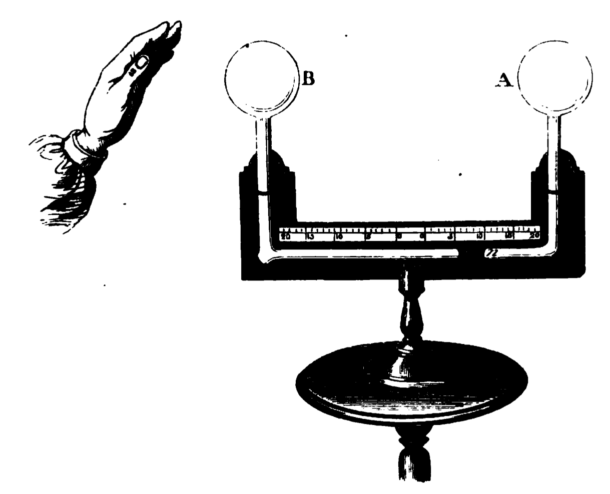


Fig. 135. — Thermomètre différentiel de Rumford.

la température du lieu où ils sont placés, mais la différence de température entre deux lieux voisins. On en distingue deux : l'un, qu'on nomme ***thermoscope***, est dû à Rumford, physicien américain, mort en France en 1814 ; l'autre, connu spécialement sous le nom de ***thermomètre différentiel***, a été inventé par Leslie, physicien écossais, mort en 1832.

La figure 135 représente le thermoscope de Rumford; il se compose de deux boules de verre pleines d'air, et réunies l'une à l'autre par un tube de verre deux fois recourbé. Dans la partie horizontale de ce tube est un petit index liquide *n*, qu'on y introduit avant que l'instrument soit fermé. Cet index est très-mobile, et

dès qu'une des boules s'échauffe plus que l'autre, l'air s'y dilate et refoule l'index vers la boule la moins chaude. Ce thermomètre est même tellement sensible, qu'il suffit d'approcher la main d'une des boules, comme le montre la figure ci-dessus, pour voir aussitôt l'index se déplacer.

Pour connaître la différence de température entre les deux boules, on place le long de la branche horizontale du tube une double échelle, dont la graduation s'obtient de la manière suivante : à la partie coudée du tube est soudé un petit appendice, dans lequel on fait arriver l'index à volonté, de manière à pouvoir ensuite faire passer une certaine quantité d'air de la boule A dans la boule B, ou réciproquement de celle-ci dans la première. Après quelques tâtonnements et après avoir fait rentrer l'index dans le tube horizontal, on parvient à obtenir que l'index s'arrête juste au milieu de ce tube lorsque les deux boules sont exactement à la même température. On marque alors zéro sur l'échelle, à chaque extrémité de l'index; puis portant l'une des boules, la boule B, par exemple, à une température supérieure à celle de l'autre boule d'une quantité connue, soit de 10 degrés centigrades, l'index avance et on marque 10 au point correspondant à son extrémité antérieure, comme le montre la figure. On partage enfin l'intervalle de 0 à 10 en dix parties égales, que l'on continue jusqu'à l'extrémité de l'échelle, dont une moitié se trouve ainsi graduée. On opère ensuite de la même manière pour graduer l'autre moitié.

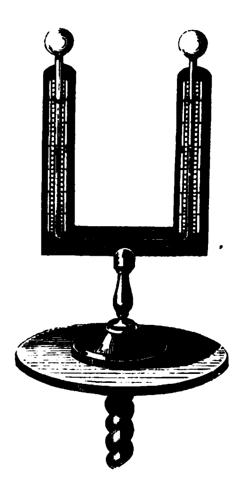


Fig. 136. — Therm. différentiel de Leslie.

La figure 136 représente le thermomètre différentiel de Leslie. Il est le même que le précédent, seulement ses boules sont plus petites, et les échelles sont appliquées le long des branches verticales, les deux zéros étant au milieu de chaque branche; en sorte qu'il y a réellement ici quatre échelles, dont une au-dessus et

une au-dessous de chaque zéro. Quant à l'index, il s'étend d'un zéro à l'autre, remplissant tout le tube horizontal et la moitié des branches verticales. La graduation s'obtient du reste absolument comme celle du thermoscope de Rumford; les usages en sont aussi tout à fait les mêmes. Nous verrons bientôt les applications des thermomètres différentiels, en parlant du calorique rayonnant.

185. **Pyromètres.** — On nomme *pyromètres*, de deux mots grecs qui signifient *mesure du feu*, des instruments destinés à mesurer les très-hautes températures. On a vu (182) que le thermomètre à mercure ne peut remplir ce but, puisque ses indications ne peuvent dépasser 350 degrés. On a donc cherché à suppléer à l'insuffisance de cet instrument en inventant plusieurs sortes de pyromètres, dont les plus connus sont le pyromètre de Wedgewood et celui de Brongniart; le premier, fondé sur le *retrait*, c'est-à-dire sur la contraction de volume que subit l'argile quand on la porte à une température élevée; le second, sur la dilatation des métaux. Mais ces instruments, qui ne donnent que des indications très-peu précises, surtout le premier, ne sont d'aucun usage dans les arts et ne méritent pas que nous en donnions la drescription. Bornons-nous à dire que jusqu'ici on manque complétement de bons instruments pour mesurer les hautes températures.

CHAPITRE II

RAYONNEMENT DU CALORIQUE.

186. **Propagation du calorique à distance.** — La chaleur que nous ressentons en présence d'un foyer, celle que nous envoie le soleil, nous montrent que le calorique peut se transmettre à distance, d'un corps à un autre, à travers l'espace, de la même manière que les corps lumineux émettent au loin, dans toutes les directions, des rayons de lumière. Le calorique qui se propage ainsi à distance se désigne sous le nom de *calorique rayonnant*, et on appelle *rayon de chaleur* ou *rayon calorifique* la ligne suivant laquelle le calorique se transmet.

Or, ce ne sont pas seulement les corps à l'état incandescent,

comme des charbons ardents, la flamme d'une lampe, le soleil, qui émettent du calorique rayonnant ; cette propriété est commune à tous les corps sans exception, et cela quelle qu'en soit la température. Par exemple, une bouteille pleine d'eau chaude et une bouteille pleine d'eau froide émettent toutes les deux du calorique ; seulement, la première en émet d'autant plus, relativement à la seconde, que la différence de leurs deux températures est plus grande.

187. **Lois du rayonnement du calorique.** — Le rayonnement du calorique est toujours soumis aux deux lois suivantes :

1° *Le rayonnement se produit également dans toutes les directions autour des corps ;* ce qu'il est facile de vérifier en plaçant un thermomètre dans différentes positions autour d'un corps chaud : dans toutes, à distance égale, il marque la même élévation de température.

2° *Le calorique se propage en ligne droite ;* en effet, si l'on interpose, entre un corps chaud et un thermomètre, un écran qui arrête les rayons, aussitôt le thermomètre cesse d'être influencé par la chaleur qu'émet le corps. Toutefois, il y a un cas où le calorique cesse de se transmettre en ligne droite, c'est lorsqu'il change de *milieu*, c'est-à-dire lorsqu'il passe d'une substance dans une autre ; par exemple, de l'air dans le verre. Nous étudierons ce phénomène, sous le nom de *réfraction*, en traitant de la lumière.

188. **Causes qui font varier l'intensité du calorique rayonnant.** — L'intensité de la chaleur qui nous est transmise par les corps chauds varie avec la température de ces corps et avec la distance qui les sépare de nous, d'après les deux lois suivantes :

1° *L'intensité de la chaleur rayonnante est proportionnelle à la température de la source qui l'émet.* Pour vérifier cette première loi, on masque avec un écran une des boules du thermomètre différentiel, et on expose l'autre au rayonnement d'un cube métallique, noirci à l'extérieur, et rempli successivement d'eau à différentes températures, par exemple à 100, à 50 et à 25 degrés ; or, si le thermomètre marque 12° dans le premier cas, on observe qu'il n'en marque que la moitié ou 6° dans le second, et 3° dans le dernier, ce qui confirme la loi.

2° *L'intensité du calorique rayonnant est en raison inverse du carré de la distance;* c'est-à-dire que placés à un mètre d'un foyer, nous en recevons une certaine quantité de chaleur; mais placés à deux mètres, nous en recevons quatre fois moins; à trois mètres, neuf fois moins, et ainsi de suite. Cette relation entre l'intensité du calorique et la distance est facile à vérifier par l'expérience à l'aide du thermomètre différentiel.

Toutefois, ce n'est que dans le vide que les deux lois ci-dessus sont rigoureuses; dans l'air, elles ne peuvent se vérifier qu'approximativement, parce que les molécules de ce fluide arrêtent toujours une certaine portion de la chaleur rayonnante et affaiblissent ainsi son intensité. Cette perte de chaleur serait encore plus sensible dans des milieux moins transparents que l'air, comme le verre, l'eau, l'alcool.

189. **Échange mutuel de calorique entre tous les corps.** — D'après le rayonnement qui se produit constamment dans toutes les directions autour des corps, il y a entre eux un échange continuel de calorique. Si les corps en présence sont tous à la même température, chacun envoie à ceux qui l'environnent une quantité de chaleur égale à celle qu'il en reçoit, et leurs températures restent stationnaires. Mais s'ils sont à des températures inégales, les plus chauds émettant plus de calorique qu'ils n'en reçoivent, leur température baisse; tandis que les moins chauds recevant plus qu'ils n'émettent, leur température s'élève; en sorte qu'il arrive un moment où la température de ces corps finit par être la même pour tous. Or, à cette époque, le rayonnement ne s'arrête pas; il continue, mais sans perte ni gain pour chaque corps, état qu'on désigne sous le nom particulier d'*équilibre mobile de température.*

D'après ce qui précède, on conçoit que les corps placés dans nos appartements tendent tous à prendre uniformément la même température; mais en général il n'en est pas tout à fait ainsi, parce que plusieurs causes concourent à refroidir les uns et à échauffer les autres. Par exemple, les corps placés près d'un mur refroidi par l'air extérieur trouvent là une cause de refroidissement. Au contraire, ceux qui occupent la partie supérieure d'une pièce chauffée tendent par cela même à acquérir une température plus

élevée, parce que l'air chaud tendant toujours à monter, comme moins dense, les couches d'air voisines du plafond sont constamment plus chaudes que les couches inférieures.

D'après l'échange continuel de calorique qui se produit entre les corps, il y a nécessairement une limite à leur refroidissement, puisqu'ils tendent toujours à reprendre d'un côté ce qu'ils perdent de l'autre. Pour qu'un corps pût se refroidir indéfiniment, il faudrait qu'il fût seul dans l'espace, ne recevant de chaleur d'aucun autre corps. Perdant alors son calorique sans en recevoir, on ne peut dire jusqu'où irait son abaissement de température. Arriverait-il à ne plus contenir aucune quantité de chaleur? On l'ignore; mais ce qu'on peut affirmer, c'est qu'il descendrait à un degré de froid beaucoup plus considérable que tous ceux qu'on a pu observer à la surface du globe.

CHAPITRE III

RÉFLEXION DU CALORIQUE, POUVOIRS RÉFLECTEUR, ABSORBANT ET ÉMISSIF.

190. **Loi de la réflexion du calorique.** — Lorsque les rayons calorifiques émis par une source de chaleur viennent à tomber sur la surface d'un corps, ils se partagent généralement en deux parties, les uns qui pénètrent dans la masse du corps et en élèvent la température, les autres qui rebondissent à sa surface à la manière d'une bille élastique qui frappe contre un corps dur, ce qu'on exprime en disant que ces rayons sont *réfléchis*. Par exemple, soit une source de chaleur, même peu intense, comme un cube de fer-blanc rempli d'eau bouillante (fig. 137), puis un écran qui ne se laisse pas traverser par la chaleur, mais qui soit percé à sa partie inférieure d'une ouverture de quelques centimètres de diamètre. Si derrière cet écran on place un corps poli sur lequel tombent les rayons calorifiques émis par le cube, et au delà un thermomètre différentiel, on voit celui-ci indiquer une élévation de température de plusieurs degrés dès qu'une de ses boules est

placée de manière à recevoir les rayons réfléchis par le corps poli. Dans cette expérience, les rayons tels que AB, qui tombent sur la surface réfléchissante, se nomment rayons *incidents*, d'un mot latin qui signifie *tomber;* et l'on appelle *angle d'incidence* non pas l'angle que ces rayons font avec la surface réfléchissante, mais

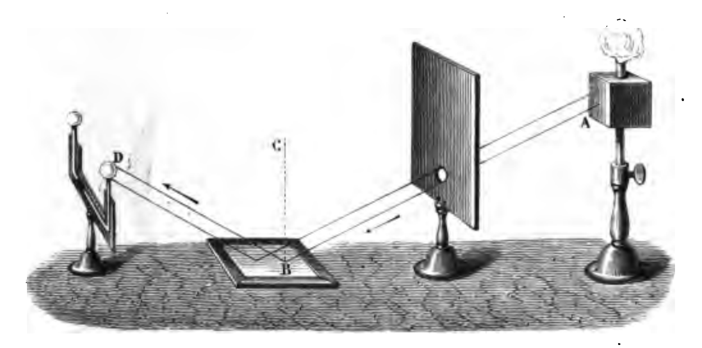


Fig. 137. — Réflexion du calorique.

l'angle ABC qu'ils font avec une droite BC perpendiculaire à cette surface. De même l'angle CBD, que font les rayons réfléchis avec la même perpendiculaire, se nomme *angle de réflexion.*

Cela posé, la réflexion de la chaleur présente toujours cette loi que *l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.* Nous verrons plus tard que la réflexion de la lumière est soumise à la même loi.

191. **Effets de la réflexion du calorique sur les miroirs concaves.** — La réflexion de la chaleur donne lieu à des effets curieux lorsqu'elle se produit sur des *miroirs concaves.* On nomme ainsi des surfaces sphériques, de verre ou de métal, concaves comme des verres de montre. Afin d'appliquer à ces surfaces la loi donnée plus haut (190) pour la réflexion sur les surfaces planes, on regarde les miroirs concaves comme formés d'une infinité de surfaces planes extrêmement petites, inclinées entre elles de manière à déterminer la courbure de ces miroirs. Or, de l'inclinaison symétrique de ces petites facettes, il résulte que lorsqu'un ensemble de rayons calorifiques tombent sur un miroir concave, tous ces rayons,

par l'effet de la réflexion, viennent concourir en un point unique auquel on donne le nom de *foyer*, pour exprimer la grande quantité de chaleur qui vient s'y concentrer.

En traitant de la lumière, nous reviendrons avec détail sur les propriétés des foyers dans les miroirs concaves; pour le moment, il suffira de faire connaître les expériences qui servent à démontrer la grande intensité qu'acquiert en ces points la chaleur réflé-

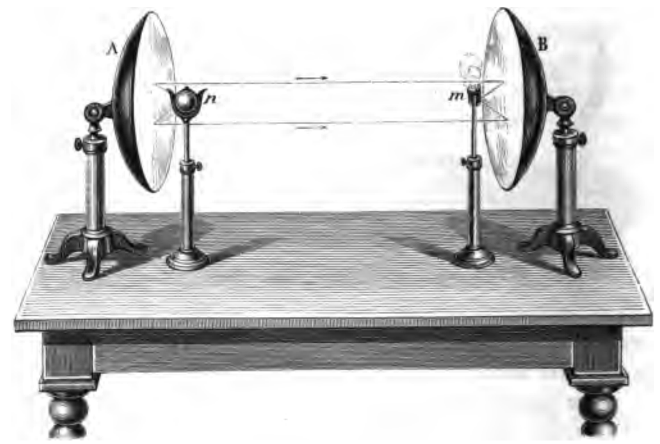


Fig. 138. — Expérience des miroirs conjugués.

chie. La figure 138 représente une expérience remarquable qu'on fait ordinairement dans les cours de physique. En regard l'un de l'autre sont deux miroirs concaves, distants de trois à quatre mètres. Au foyer de l'un est un boulet de fer *n*, chauffé à la température rouge; au foyer de l'autre est un corps inflammable *m*, par exemple un morceau d'amadou. Or, les rayons de chaleur émis par le boulet dans la direction du miroir A, se réfléchissant sur ce dernier, sont renvoyés vers le miroir B, comme le montrent les deux traits figurés de l'un à l'autre. Arrivés sur le second miroir, les rayons se réfléchissent de nouveau et viennent se concentrer sur le corps *m* qu'ils enflamment.

On peut encore produire le même effet avec les rayons solaires.

Pour cela, on reçoit un faisceau de ces rayons sur un réflecteur concave, comme le montre la figure 139, et en maintenant au foyer, pendant quelques instants, un corps inflammable, comme du papier, du bois blanc, un bouchon de liége, en ayant soin de

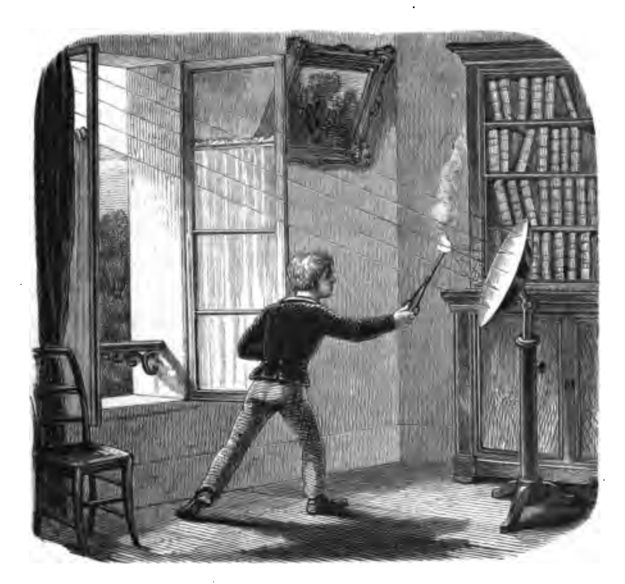


Fig. 139. — Miroir ardent.

les tenir avec une pince pour ne pas se brûler les doigts, on voit ce corps prendre feu. L'effet produit dépend ici de la grandeur des miroirs. Avec un miroir ayant 1^{m},74 *d'ouverture*, c'est-à-dire d'un bord à l'autre, on a fondu le cuivre et l'argent en quelques minutes; l'ardoise s'est transformée en un verre noir qu'on a pu étirer en fil; les pierres siliceuses et les cailloux ont été ramollis et fondus.

La facilité avec laquelle on peut enflammer les corps à l'aide des miroirs concaves leur a fait donner le nom de ***miroirs ardents***. On rapporte qu'Archimède embrasa par ce moyen les vaisseaux des Romains devant la ville de Syracuse. Depuis, le fait a été

révoqué en doute par quelques auteurs; mais Buffon a fait voir qu'il était possible. En effet, ce célèbre naturaliste parvint, par un soleil ardent d'été, à embraser une planche de bois goudronnée à 68 mètres de distance, en se servant d'un immense réflecteur concave, composé de 128 miroirs de verre, chacun d'une surface de trois décimètres carrés et demi; ils étaient montés à charnière sur un châssis commun, de manière à recevoir l'inclinaison convenable pour renvoyer toute la chaleur vers un même point.

192. **Pouvoir réfléchissant des diverses substances.** — Nous avons déjà fait observer (190) que la chaleur qui tombe sur un corps se partage toujours en deux parties, l'une réfléchie à la surface, l'autre absorbée, c'est-à-dire pénétrant dans la masse du corps et élevant sa température. Or, les quantités de chaleur ainsi absorbées ou réfléchies sont très-variables d'une substance à une autre; les unes réfléchissent beaucoup et absorbent peu, ce qu'on exprime en disant qu'elles ont un grand *pouvoir réfléchissant;* d'autres, au contraire, réfléchissent peu la chaleur, mais l'absorbent beaucoup, c'est-à-dire qu'elles ont un grand *pouvoir absorbant*. Il est évident d'ailleurs que ces deux propriétés doivent être en raison inverse l'une de l'autre, car tout corps qui absorbe beaucoup de chaleur ne peut en réfléchir que très-peu, et réciproquement.

Afin de comparer entre eux les pouvoirs réflecteurs des différentes substances, Leslie prenait pour source de chaleur un cube de fer-blanc plein d'eau à 100 degrés, qu'il plaçait devant un réflecteur concave (fig. 140). Les rayons émis par cette source de chaleur dans la direction du réflecteur, tendaient à aller concourir au foyer F. Mais en avant de celui-ci étaient placées successivement de petites plaques carrées de papier, de verre, de métal, en un mot, des différentes substances dont on cherchait le pouvoir réflecteur. Cela posé, les rayons réfléchis une première fois sur le miroir concave, se réfléchissaient une seconde fois, mais en sens contraire, sur les plaques, et venaient enfin tomber sur la boule d'un thermomètre différentiel, comme le montre le dessin ci-après. Or, dans cette expérience, la source de chaleur restant la même, ainsi que sa distance au réflecteur, le thermomètre indique des degrés de chaleur très-différents, suivant la substance dont les

petites plaques sont formées. C'est quand elles sont en cuivre jaune poli que le thermomètre accuse la plus haute température, ce qui prouve que c'est ce métal qui a le plus grand pouvoir réflecteur. Celui de l'argent n'est que les $\frac{9}{10}$ de celui du cuivre jaune; celui de l'étain $\frac{8}{10}$; celui du verre $\frac{1}{10}$. Enfin, pour l'eau et le noir de fumée, le pouvoir réflecteur est nul; ce qu'on reconnaît, parce

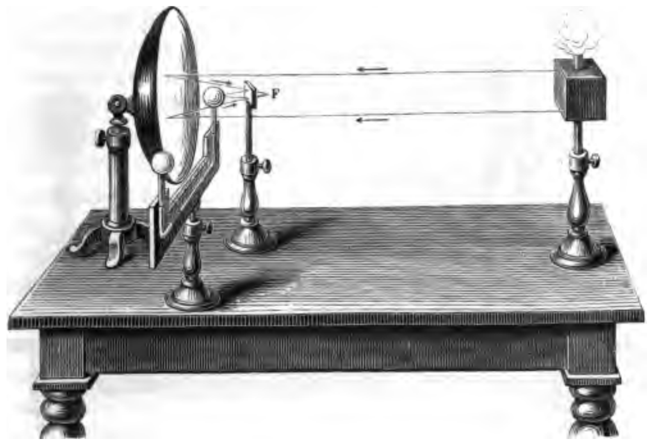


Fig. 140. — Pouvoir réflecteur.

qu'en recouvrant de noir de fumée ou en mouillant les plaques devant lesquelles est placé le thermomètre différentiel, celui-ci n'indique aucune élévation de température; ce qui prouve qu'il ne reçoit plus de chaleur.

193. **Pouvoir absorbant.** — Pour comparer entre eux les pouvoirs absorbants des différentes substances, Leslie a disposé ses expériences comme dans la figure 141. La source de chaleur et le réflecteur étant les mêmes que dans l'expérience précédente, la boule du thermomètre différentiel est placée au foyer même, où elle reçoit directement toute la chaleur réfléchie par le miroir. Mais ici, au lieu de conserver la boule *focale*, celle qui est au foyer, constamment identique à elle-même, on modifie sa surface et, par suite, son pouvoir absorbant, en la recouvrant successivement de

papier, de feuilles minces d'étain, d'or, d'argent, de cuivre, etc.; enfin, on fait aussi déposer dessus une légère couche de noir de fumée, on la mouille, et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'on ait expérimenté successivement sur toutes les substances dont on veut connaître le pouvoir absorbant. Or, on observe que c'est lorsque la boule focale est recouverte de noir de fumée, ou mouillée, que le

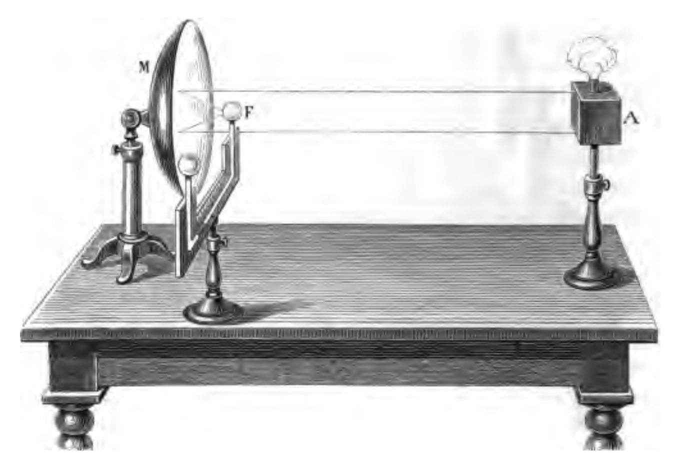


Fig. 141. — Pouvoir émissif.

thermomètre accuse la plus haute température; d'où l'on conclut que ce sont ces substances qui ont le plus grand pouvoir absorbant. Au contraire, c'est quand la boule est recouverte de feuilles de métal, et surtout de cuivre jaune, que le thermomètre marque le plus petit accroissement de température, ce qui montre que ce sont les métaux, et particulièrement le cuivre jaune, qui laissent le moins pénétrer la chaleur, qui ont le plus faible pouvoir absorbant. En un mot, on arrive à ce résultat, qu'il était facile de prévoir, que ce sont les corps qui réfléchissent le mieux la chaleur qui l'absorbent plus difficilement, et réciproquement, que ce sont les moins bons réflecteurs qui l'absorbent davantage.

194. **Pouvoir émissif.** — Le *pouvoir émissif* ou *pouvoir rayon-*

nant est la propriété que possèdent les corps d'émettre plus ou moins facilement la chaleur qu'ils contiennent; c'est donc l'inverse du pouvoir absorbant.

C'est encore au moyen de l'appareil représenté dans la figure 141 que Leslie a comparé entre eux les pouvoirs émissifs des corps. Seulement, dans ce cas, ce n'est plus la boule focale du thermomètre qu'on recouvre successivement de diverses substances, ce sont les faces du cube de fer-blanc dans lequel est l'eau chaude. Par exemple, une de ces faces conservant son étamage, la seconde est noircie avec du noir de fumée, sur la troisième est collée une feuille de papier blanc, et enfin sur la quatrième est appliquée une plaque de verre.

Or, si l'on tourne d'abord la face noircie vers le réflecteur, le thermomètre marque une forte élévation de température, ce qui indique que le cube envoie alors beaucoup de chaleur vers le réflecteur. Si l'on présente ensuite la face recouverte de papier, on voit l'index du thermomètre revenir un peu vers la boule focale; d'où l'on conclut que le papier émet moins de chaleur que le noir de fumée; avec la face recouverte d'une plaque de verre, le thermomètre accuse une émission encore moindre; enfin, c'est la face de fer-blanc pour laquelle l'émission est la plus faible.

En procédant ainsi, Leslie a trouvé que ce sont le noir de fumée et l'eau qui ont le plus grand pouvoir émissif; viennent ensuite le papier, le verre blanc ordinaire, puis les métaux. L'ordre dans lequel sont ici rangés les corps d'après leurs pouvoirs émissifs étant le même que celui qui a été trouvé plus haut (193) pour les pouvoirs absorbants, on en conclut que les corps qui rayonnent le plus de chaleur sont aussi ceux qui en émettent davantage. Du reste, des expériences directes faites par deux physiciens français, Dulong et Petit, ont prouvé que pour chaque substance le pouvoir émissif est toujours rigoureusement égal au pouvoir absorbant.

195. **Causes qui modifient les pouvoirs réfléchissant, absorbant et émissif.** — La propriété de réfléchir, d'absorber ou d'émettre plus ou moins facilement le calorique ne varie pas seulement d'une substance à une autre, mais plusieurs circonstances peuvent encore la faire varier pour un même corps. Les principales sont le poli plus ou moins parfait des surfaces, l'accroissement de densité,

l'obliquité des rayons incidents, la nature de la source de chaleur et enfin la coloration des corps.

Leslie constata, le premier, qu'un miroir concave concentre d'autant plus de chaleur à son foyer qu'il est poli avec plus de soin ; et de là il avait conclu que le pouvoir réflecteur croissait d'une manière générale avec le degré de poli des surfaces, et que les autres pouvoirs, au contraire, diminuaient. Mais depuis les expériences de Leslie on a reconnu que c'est l'augmentation de densité qui tend surtout à rendre le pouvoir réflecteur plus grand. Par exemple, l'expérience représentée dans la figure 138 réussit beaucoup mieux et peut se faire à une distance double, si les miroirs, au lieu d'être travaillés et polis au tour, ont été battus à froid sur une enclume à coups de marteau. Dans ce cas, ils ont été écrouis, c'est-à-dire que les molécules se sont rapprochées, le métal est devenu plus dense, à la surface surtout, et il réfléchit davantage la chaleur. Les substances qui ne sont pas susceptibles de s'écrouir sous le marteau, comme le marbre, l'ivoire, ne réfléchissent ni plus ni moins, qu'elles soient polies ou qu'elles ne le soient pas.

Le pouvoir réflecteur varie encore avec l'obliquité des rayons incidents. Plus ils sont inclinés, mieux ils sont réfléchis; au contraire, plus leur direction s'approche de la perpendiculaire à la surface qui les reçoit, moins ils sont réfléchis. C'est une des raisons pour lesquelles le sol s'échauffe plus l'été que l'hiver ; car, l'été, les rayons solaires sont moins obliques, par suite moins réfléchis par le sol et mieux absorbés.

Quant aux pouvoirs absorbant et émissif, comme ils sont toujours en raison inverse du pouvoir réflecteur, il découle de ce qui précède qu'en écrouissant un métal, il absorbe et émet moins facilement la chaleur; il en découle aussi que les rayons incidents les plus facilement absorbés par un corps sont ceux qui sont perpendiculaires à sa surface.

Le pouvoir absorbant varie encore avec la nature de la source de chaleur. Par exemple, pour une même quantité de chaleur incidente, le blanc de céruse en absorbe à peu près deux fois plus, si elle est émise par un cube plein d'eau chaude à 100 degrés, que si elle l'est par une lampe. Le noir de fumée, au contraire, absorbe

toujours la même quantité de chaleur, quelle qu'en soit la source.

La coloration des corps peut aussi exercer une influence sur leurs pouvoirs réflecteur, absorbant et émissif. Généralement, le blanc et les teintes claires absorbent peu et réfléchissent beaucoup; l'inverse a lieu pour le noir et les couleurs sombres.

196. **Applications diverses.** — La propriété que possèdent les différentes substances de se laisser pénétrer plus ou moins facilement par la chaleur, et de la réfléchir en quantité inégale, présente de nombreuses applications dans l'économie domestique et dans les arts. Par exemple, s'agit-il de faire choix de vêtements d'hiver ou d'été; dans les deux saisons, c'est aux vêtements blancs qu'on doit donner la préférence. En effet, leur pouvoir émissif étant moindre que celui des vêtements noirs, ils s'opposent davantage, pendant l'hiver, à la déperdition de la chaleur propre du corps humain. En été, au contraire, à cause de leur plus grand pouvoir réfléchissant, ils arrêtent la chaleur qui tend à les pénétrer, la réfléchissent à l'extérieur, et sont ainsi plus frais que des vêtements noirs. Le linge, par sa blancheur, est donc un préservatif contre la déperdition de la chaleur du corps.

C'est sans doute pour cette raison que la nature a donné aux animaux qui habitent les régions boréales un pelage blanc, surtout pendant l'hiver. Les nègres qui habitent les régions équatoriales paraissent moins bien partagés; mais il est à remarquer qu'une matière huileuse qui transsude naturellement de leur peau en diminue le pouvoir absorbant et les préserve de l'action trop vive des rayons solaires. Les Lapons, les Esquimaux, qui vivent au milieu de glaces éternelles, se frottent le corps d'huile de poisson pour s'opposer à la déperdition de la chaleur animale. Ici, la matière grasse nuit au rayonnement; chez les nègres, c'est à l'absorption.

La neige, d'après son éclatante blancheur, est douée d'un grand pouvoir réflecteur, et, par suite, absorbe et émet peu de calorique. C'est à cause de son faible pouvoir émissif qu'elle préserve du froid le sol et les plantes qu'elle recouvre; et c'est à cause de son faible pouvoir absorbant qu'elle fond lentement pendant les temps de dégèle; mais qu'une branche d'arbre, une barre de métal, une pierre, se trouvent au milieu d'une masse de neige, elles en accé-

lèrent la fusion par la chaleur qu'elles absorbent de l'atmosphère et qu'elles rayonnent ensuite autour d'elles. Dans les Alpes, les montagnards, pour accélérer la fusion de la neige, projettent dessus de la terre, qui agit par son pouvoir absorbant.

Pour les vases métalliques dans lesquels on fait cuire les aliments, il y a avantage à ce que leur surface soit noire et dépolie, car alors le pouvoir absorbant est plus grand, et ils s'échauffent plus vite. L'éclat qu'on est dans l'habitude de leur donner est donc acheté aux dépens du combustible. S'il s'agit, au contraire, de conserver un liquide chaud le plus longtemps possible, il sera préférable de le renfermer dans un vase de métal poli et brillant, puisque le pouvoir émissif étant moindre, le refroidissement sera plus lent. C'est, en effet, ce qu'on remarque avec des vases d'argent, de porcelaine blanche vernie. Dans des pots de terre commune, non vernie, les liquides s'échauffent plus rapidement, mais se refroidissent de même.

Dans nos maisons, les revêtements extérieurs des poêles et des calorifères devraient toujours être noirs pour donner une plus libre émission au calorique; au contraire, l'intérieur de nos cheminées devrait être revêtu de carreaux de porcelaine ou de faïence blanche, afin d'augmenter le pouvoir réflecteur du foyer vers l'appartement.

CHAPITRE IV

CONDUCTIBILITÉ DES CORPS POUR LA CHALEUR.

197. **Conductibilité des corps solides.** — Dans tous les phénomènes qu'on vient de considérer sous le nom de *rayonnement*, le calorique se transmet constamment d'un corps à un autre à travers l'espace; or, il peut aussi se propager dans la masse même des corps par un véritable rayonnement interne de molécule à molécule. C'est cette propagation intérieure dans la masse des corps qu'on désigne sous le nom de *conductibilité;* et on appelle *bons conducteurs* les corps qui transmettent facilement le calorique

dans leur masse, tandis que ceux dans lesquels cette propagation s'opère difficilement sont dits ***mauvais conducteurs.***

Pour montrer l'inégale conductibilité des sorps solides, Ingenhousz, médecin hollandais, mort à la fin du siècle dernier, faisait usage du petit appareil représenté dans la figure 142. C'est une petite caisse de fer-blanc, à laquelle sont adaptés, à l'aide de tubulures et de bouchons, des baguettes de diverses substances, par exemple, de fer, de cuivre, de marbre, de bois, de verre. Ces ba-



Fig. 142. — Appareil d'Ingenhousz.

guettes, qui pénètrent de quelques millimètres dans la caisse, sont recouvertes d'une couche de cire jaune ordinaire qui fond à 61 degrés. Cela posé, si l'on remplit la caisse d'eau à 100 degrés, on remarque que sur les baguettes métalliques la cire fond rapidement jusqu'à une certaine distance des tubulures; tandis que sur les autres baguettes on n'observe aucune trace de fusion, ce qui montre que la chaleur de la caisse se propage plus facilement dans les premières baguettes que dans les secondes. En effet, non-seulement l'expérience ci-dessus, mais d'autres plus précises, font voir que de tous les corps les meilleurs conducteurs sont les métaux. Après eux viennent le marbre, la porcelaine, les briques, le bois, le verre, la résine.

198. **Conductibilité des liquides, mode d'échauffement.** — Les liquides sont tous très-mauvais conducteurs du calorique, excepté

toutefois le mercure, qui est un métal. Ils conduisent même si peu que Rumford avait admis que l'eau ne conduisait pas du tout. Mais sa conductibilité, quoique très-faible, a été mise hors de doute, ainsi que celle des autres liquides, par des expériences précises.

D'après leur faible conductibilité, les liquides ne s'échauffent pas à la manière des solides. En effet, qu'on chauffe un corps solide par le haut, par le bas ou par l'une quelconque de ses faces latérales, dans tous les cas la chaleur se transmet de proche en proche et toute la masse s'échauffe. Or, il n'en est plus ainsi d'un liquide; si on le chauffe par le haut, la chaleur ne se propage qu'avec une extrême lenteur, et on ne peut parvenir ainsi à l'échauffer complétement. Si on l'échauffe par le bas, la température du liquide s'élève rapidement; toutefois, ce n'est point par conductibilité, mais par des courants ascendants et descendants qui, vu la mobilité des molécules, se produisent dans toute la masse liquide.

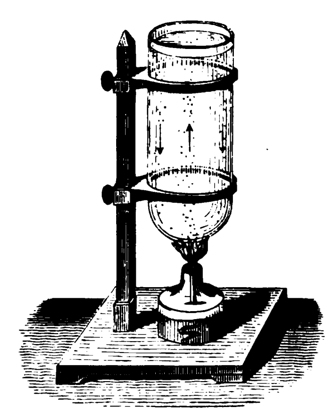


Fig. 143. — Mode d'échauffement des liquides.

Pour démontrer l'existence de ces courants, on dispose l'expérience comme on le voit dans la figure 143. Dans un vase de verre un peu profond, on met de l'eau dans laquelle on projette une poussière ayant à peu près la même densité qu'elle, par exemple de la sciure de chêne; puis on chauffe doucement ce vase à sa partie inférieure. Or, à mesure que les couches les plus basses s'échauffent, elles se dilatent, deviennent moins denses et s'élèvent dans le liquide, tandis que les couches supérieures, plus froides et plus denses, descendent pour prendre la place des premières, s'échauffer à leur tour, puis remonter, et ainsi de suite jusqu'à ce que toute la masse soit échauffée. En effet, ces courants deviennent sensibles par la sciure de chêne qu'on voit s'élever lentement au centre du liquide et redescendre près des bords.

199. **Conductibilité des gaz.** — Les gaz sont très-mauvais conducteurs de la chaleur; mais il n'est pas facile de le constater directement, à cause de l'extrême mobilité de leurs molécules. En effet, aussitôt qu'ils sont échauffés en une partie quelconque de leur masse, il se produit des dilatations et des courants, en vertu desquels les parties échauffées vont se mélanger avec les parties froides; de là une élévation générale de température qu'on serait porté à regarder comme un effet de conductibilité. Mais toutes les fois que les gaz sont gênés dans leurs mouvements, on remarque que leur conductibilité paraît être sensiblement nulle, comme le prouvent les différents exemples ci-après.

200. **Applications diverses.** — La différence de conductibilité des corps nous donne l'explication de plusieurs phénomènes et nous présente des applications nombreuses. Par exemple, dans nos habitations, si les carreaux de brique nous paraissent plus froids que les parquets, c'est qu'ils conduisent mieux le calorique. Les tapis sont encore plus chauds que les parquets, parce qu'ils conduisent moins bien.

C'est à cause de la faible conductibilité des matières ligneuses qu'on recouvre d'osier les manches des cafetières de cuivre, qu'on met des manches de bois aux théières, aux fourneaux portatifs, et des poignées de même matière aux fers à repasser.

Des corps qui sont sensiblement à la même température nous occasionnent souvent des sensations de froid ou de chaleur très-différentes lorsque nous les touchons; c'est encore là un effet de leur plus ou moins de conductibilité. Par exemple, dans un appartement, posez la main sur un meuble de bois ou sur les feuillets d'un livre, ils vous paraîtront peu froids; posez-la sur une console en marbre, la sensation de froid sera plus grande; elle le sera davantage encore si vous touchez un métal. Tous ces corps, qui sont plus froids que votre main, lui enlèvent du calorique, mais en quantité inégale; ce sont les meilleurs conducteurs qui en enlèvent le plus, parce qu'ils le transmettent plus facilement dans leur masse. Si tous ces corps étaient plus chauds que votre main, mais tous à la même température entre eux, c'est le métal qui vous paraîtrait le plus chaud, puis le marbre, le bois et le papier, car alors ce sont les meilleurs conducteurs qui cèdent le plus de chaleur.

Pour conserver de la glace dans la saison chaude, on l'entoure de paille, de sciure de bois, de couvertures de laine; on emploie les mêmes moyens, pendant les froids, pour préserver les plantes de la gelée. Dans le premier cas, il s'agit de s'opposer à l'accès du calorique; dans le second, à sa déperdition; et c'est toujours à l'aide de substances non conductrices.

Le plumage des oiseaux, les fourrures des animaux, sont des applications que nous offre la nature de la non-conductibilité de l'air. En effet, non-seulement les plumes, les fourrures, la laine, le coton, sont des substances peu conductrices; mais entre leurs fibres se trouve interposée une masse d'air très-considérable, qui se comporte comme un écran pour s'opposer à la déperdition de la chaleur. Dans les pays chauds, les fourrures des animaux sont à poil ras et peu serré; dans le Nord, au contraire, elles sont en général longues, serrées et très-fines. C'est chez les oiseaux des régions glaciales que se trouve ce duvet moelleux qu'on nomme *édredon*, et qui, avec la fourrure du lièvre blanc de Russie, est une des substances qui retiennent le mieux la chaleur.

Dans le règne végétal, l'écorce des arbres, qui est peu dense et dont le tissu très-poreux contient beaucoup d'air, est aussi un excellent préservatif contre le froid. Enfin, c'est par leur structure fibreuse et par l'air qui en remplit les interstices que les vêtements que nous appelons *chauds* nous préservent du froid. Ils ne sont pas chauds par eux-mêmes, ils ne nous donnent point de chaleur, mais ils maintiennent autour de nous une couche d'air qui devient un obstacle au dégagement de la chaleur. Aussi plus les fibres des tissus de nos vêtements sont longues, plus ceux-ci nous paraissent chauds. C'est par la même cause que, couché sur un lit de plumes et recouvert de couvertures de laine, ou mieux d'un édredon, le corps conserve bien sa chaleur pendant le sommeil.

CHAPITRE V

MESURE DES DILATATIONS DES SOLIDES, DES LIQUIDES ET DES GAZ.

201. **Valeur de la dilatation des solides.** — La dilatation des corps par la chaleur étant un effet général qui exerce son influence sur tous les objets qui nous entourent, et modifie sans cesse leur forme et leur volume, on conçoit que ce n'est pas seulement dans les expériences de physique et de chimie qu'il importe de tenir compte des accroissements de volume qui résultent de l'élévation de la température, mais encore dans une foule de circonstances qui intéressent les arts. Aussi les physiciens se sont-ils livrés à des expériences délicates pour déterminer avec précision la quantité dont chaque substance se dilate pour une élévation de température donnée. Ce sont les résultats de ces recherches que nous allons faire connaître, en nous occupant d'abord de ce qui a rapport aux solides. Mais comme on a vu (175) qu'il y a lieu de considérer dans ces corps deux sortes de dilatation, l'une en longueur et l'autre en volume, il en résulte que l'étude des dilatations se divise en deux parties : la première relative aux dilatations linéaires, la seconde aux dilatations cubiques.

Dilatation linéaire. — On a pris pour terme de comparaison de la dilatation linéaire des corps entre eux, l'allongement que prend l'unité de longueur lorsqu'elle est chauffée de zéro à un degré, et on a donné à cet allongement le nom de ***coefficient de dilatation linéaire***. Les coefficients de dilatation linéaire d'un grand nombre de substances ont été déterminés, à la fin du siècle dernier, par deux physiciens français, Lavoisier et Laplace. Leur méthode consistait à réduire en barre la substance dont ils cherchaient la dilatation ; puis maintenant la barre dans de la glace fondante, ils en déterminaient d'abord la longueur à zéro ; la plaçant ensuite dans un bain d'eau chauffée, par exemple, à 100 degrés, ils en mesuraient de nouveau la longueur à cette température. Or,

ils observaient alors un allongement qui représentait la dilatation totale pour une élévation de température de 100 degrés. Divisant cet allongement par 100, on avait la dilatation de toute la barre pour 1 degré, et divisant enfin cette dernière dilatation par le nombre d'unités de longueur qu'avait la barre, on obtenait l'allongement correspondant à un seul degré et à une seule unité de longueur, c'est-à-dire le coefficient de dilatation linéaire. C'est ainsi qu'on a obtenu les nombres suivants :

Coefficients de dilatation linéaire pour 1 degre.

Verre	0,00000861	Cuivre rouge . . .	0,00001718
Platine	0,00000884	Cuivre jaune . . .	0,00001878
Acier	0,00001079	Argent	0,00001909
Fer	0,00001220	Plomb.	0,00002857
Or.	0,00001466	Zinc.	0,00002942

A l'inspection du tableau ci-dessus, on reconnaît que les coefficients de dilatation sont toujours très-petits. Par exemple, le coefficient du cuivre jaune étant 0,000018 environ, cela veut dire qu'une tige de cette matière, lorsque sa température s'élève d'un degré, s'allonge seulement des 18 millionièmes de sa longueur; ou, ce qui est la même chose, qu'une tige d'un million de mètres de longueur s'allongerait, dans le même cas, de 18 mètres.

Dilatation cubique. — On nomme *coefficient de dilatation cubique* d'une substance l'accroissement que prend l'unité de volume de cette substance pour une élévation de température d'un degré. Le calcul faisant voir que le coefficient de dilatation cubique d'un corps est triple de son coefficient de dilatation linéaire, les premiers se déduisent des nombres compris dans le tableau ci-dessus en les multipliant par 3.

202. Applications de la dilatation des solides. — La dilatation des corps par la chaleur nous donne l'explication de plusieurs phénomènes. Par exemple, lorsqu'on verse trop brusquement de l'eau chaude dans un vase de verre, il éclate; cela est dû à ce que le verre étant mauvais conducteur du calorique, la paroi inté-

rieure s'échauffe beaucoup plus que la paroi extérieure, d'où résulte une dilatation inégale qui détermine la rupture. Plus les parois sont minces, plus la masse tend à s'échauffer également, et moins la rupture est à craindre. Dans un vase de métal, le même accident ne se produit pas, parce que les métaux étant bons conducteurs du calorique, toute la masse s'échauffe et se dilate également.

C'est encore par un effet d'inégale dilatation qu'une bougie posée trop près d'une glace y détermine de nombreuses fêlures. Quelquefois, dans nos appartements, un objet de verre ou de cristal se brise seul au moment où l'on ouvre une porte ou une croisée. Ce phénomène a pour cause une contraction irrégulière occasionnée par un courant d'air froid qui rentre de l'extérieur, et vient frapper le vase. En général, pour tous les objets de verre, substance dans laquelle la chaleur se propage difficilement, on doit éviter les variations trop brusques de température, sinon ces objets éclatent.

Dans les arts de construction, il importe de tenir compte de la dilatation des métaux ; par exemple, dans la pose des rails sur les voies de fer, si chaque rail était en contact immédiat avec le suivant, l'ensemble des rails se comportant comme une barre unique, il en résulterait, pour des voies un peu longues, des dilatations considérables qui forceraient les rails à se courber, ou les arracheraient des *traverses* de bois sur lesquelles ils sont fixés. En effet, le coefficient de dilatation du fer étant 0,000012, il en résulte qu'une barre de fer d'un mètre de longueur, dont la température varie de 30 degrés, s'allonge de 30 fois 0,000012, c'est-à-dire de $0^m,00036$, et que, par suite, 1000 mètres s'allongent, dans le même cas, de $0^m,36$. Or, si l'on considère la voie de fer de Paris au Havre, sa longueur étant de 229 kilomètres, l'allongement total des rails serait de 229 fois 36 centimètres, ou environ de 82 mètres; et comme les variations de température des rails peuvent être bien supérieures à 30 degrés, il se produit en réalité des allongements ou des contractions encore plus considérables. On évite les accidents qui en résulteraient en laissant entre deux rails consécutifs assez d'intervalle pour que la dilatation s'opère librement.

Du reste, la force avec laquelle les métaux tendent à se dilater

par l'action de la chaleur est considérable, et rien ne peut lui résister; aussi a-t-on pu l'utiliser dans les arts pour redresser des murailles et rapprocher des voûtes fendues.

203. **Pendule compensateur.** — Le pendule compensateur est encore une application de la dilatation des métaux. Pour en comprendre l'utilité, rappelons ce qui a été dit en traitant de la théorie du pendule (54), que ses oscillations sont isochrones, c'est-à-dire se font toutes en temps égaux, et que c'est cette propriété qui l'a fait appliquer comme régulateur aux horloges. Or, on a vu aussi que plus un pendule est long, plus il oscille lentement; et que plus il est court, plus ses oscillations sont rapides. Par conséquent, un pendule formé d'une seule tige terminée par une lentille, comme celui représenté dans la figure 38, ne pourrait être un régulateur exact, car la température s'élevant, il s'allongerait, et l'horloge retarderait; l'inverse aurait lieu s'il se contractait par le refroidissement. Ces inconvénients ont été corrigés, en 1738, par Leroy, horloger à Paris, en empruntant le remède à la cause même du mal.

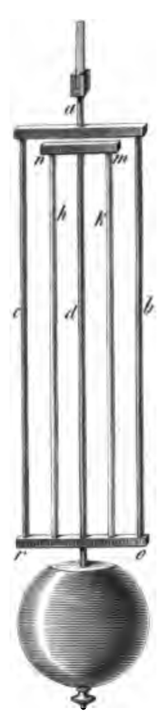


Fig. 144. — Pendule compensateur.

Pour cela, Leroy a composé la tige du pendule de plusieurs barres métalliques disposées comme le montre la figure 144. Les tiges *a*, *b*, *c*, *d* sont en acier, et s'allongent toutes de haut en bas lorsque la température s'élève, ce qui fait descendre la lentille. La tige *d*, qui porte cette dernière, est fixée à une pièce *mn*, supportée elle-même par deux tiges *k* et *h*, qui sont soudées sur la pièce *or*, et, par suite, ne peuvent se dilater de haut en bas, mais seulement de bas en haut; ce qu'elles font en soulevant la pièce *mn*, et avec elle la lentille. En sorte que pour que celle-ci ne monte ni ne descende, il suffit que la dilatation de bas en haut des tiges *k* et *h* compense exactement celle en sens contraire des tiges

a, *b*, *c*, *d*. On arrive à ce résultat en construisant les tiges *k* et *h* en laiton, métal plus dilatable que l'acier, et en donnant respectivement aux tiges de cuivre et d'acier des longueurs qui soient en raison inverse des coefficients de dilatation de ces deux métaux; c'est-à-dire que si le cuivre jaune était, par exemple, deux fois plus dilatable que l'acier, sa longueur devrait être deux fois moindre que celle de ce dernier métal.

DILATATION DES LIQUIDES.

204. Dilatation absolue et dilatation apparente des liquides. — On a déjà vu que les liquides sont plus dilatables que les solides (175), ce qui est une conséquence de leur faible cohésion; mais leur dilatation est beaucoup moins régulière, et l'est d'autant moins que leur température approche davantage de celle à laquelle ils entrent en ébullition.

Dans les corps solides, il y a eu lieu de considérer deux sortes de dilatation, l'une en longueur, l'autre en volume. Or, il est évident que cette dernière est la seule qu'on ait à observer dans les liquides, mais on peut l'envisager sous deux points de vue: la ***dilatation absolue*** et la ***dilatation apparente***. La première est l'accroissement réel de volume que prend un liquide quand il s'échauffe, tandis que la dilatation apparente est celle qui se produit à l'œil, celle qu'on observe dans l'enveloppe qui contient le liquide. Par exemple, dans les thermomètres, quand le liquide se dilate et monte dans la tige, ce n'est là qu'une dilatation apparente, qui est moindre que la dilatation réelle. En effet, en même temps que le mercure se dilate, la boule du thermomètre se dilate aussi, elle augmente de volume, et, par suite, le liquide ne s'élève pas aussi haut qu'il le ferait si le volume de la boule restait invariable. Or, comme, quelle que soit la nature de l'enveloppe dans laquelle est contenu un liquide, ce dernier est toujours plus dilatable que l'enveloppe, on voit que ce sont constamment des dilatations apparentes qu'on observe dans les liquides.

Pour les liquides, de même que pour les solides, le coefficient de dilatation est l'accroissement que prend l'unité de volume pour

une élévation de température d'un degré. Les coefficients varient beaucoup d'un liquide à un autre. Dans une enveloppe de verre, le coefficient de dilatation apparente du mercure est 15 cent millièmes; celui de l'eau est 46 cent millièmes, c'est-à-dire trois fois plus grand; l'alcool se dilate encore davantage, car son coefficient de dilatation est 116 cent millièmes, ou presque trois fois celui de l'eau. Les coefficients de dilatation absolue sont un peu plus grands.

205. **Maximum de densité de l'eau.** — L'eau présente ce phénomène remarquable que, se contractant d'abord, comme tous les corps, par le refroidissement, il vient un moment où, quoique l'abaissement de température continue, la contraction cesse et même se change en une dilatation. C'est à 4 degrés au-dessus de zéro que l'eau atteint sa plus grande contraction, ou, ce qui est la même chose, son *maximum* de densité. Cette observation a été faite en comparant la marche d'un thermomètre à eau, c'est-à-dire contenant de l'eau, avec celle d'un thermomètre à mercure. On a ainsi observé que l'eau, dans le premier, se contractait de plus en plus jusqu'à ce que le thermomètre à mercure fût descendu à 4 degrés; mais qu'ensuite, ce dernier continuant à descendre vers zéro, le thermomètre à eau remontait. Ce phénomène dépend sans doute d'un nouvel arrangement que prennent les molécules d'eau avant la congélation; quelques autres substances offrent des anomalies analogues; ainsi, le fer, le soufre, le bismuth fondus se dilatent au moment de la solidification.

Le maximum de densité que prend l'eau à 4 degrés donne l'explication de ce fait, observé en Suisse, que la température de l'eau au fond des lacs est toujours voisine de 4 degrés, quoique les couches supérieures éprouvent des variations de température telles qu'en hiver elles se congèlent, tandis que l'été elles s'échauffent jusqu'à 25 degrés. En effet, à l'entrée de l'hiver, les couches supérieures se refroidissant graduellement au contact de l'air, elles arrivent à 4 degrés, et alors, à cause de leur plus grande densité, elles descendent et sont remplacées par d'autres qui se refroidissent à leur tour, et ainsi de suite jusqu'à ce que toute la masse d'eau soit à 4 degrés. Or, à partir de ce moment, les couches supérieures continuant à se refroidir, il y a dilatation; par suite,

elles cessent de descendre, et voilà comment il se fait que la température du fond des lacs reste tout l'hiver à 4 degrés, quoique la surface soit congelée. L'été, c'est la fonte des neiges sur les sommets des Alpes qui alimentent les lacs d'eaux froides, lesquelles, en raison de leur densité, se rendent encore dans les parties les plus basses, et contribuent ainsi à y maintenir, été comme hiver, une température voisine de 4 degrés.

C'est parce que l'eau présente un maximum de densité à 4 degrés, que, dans le système métrique, on a adopté, pour *unité de poids*, le poids, dans le vide, d'un centimètre cube d'eau distillée prise à la température de 4 degrés.

DILATATION DES GAZ.

206. **Valeur de la dilatation des gaz.** — Les gaz n'ont pas seulement pour caractère d'être les plus dilatables de tous les corps, ce sont encore ceux dont la dilatation est la plus régulière. On a d'abord admis, en se fondant sur des expériences faites par Gay-Lussac, que tous les gaz se dilataient de la même quantité pour une même élévation de température, c'est-à-dire qu'ils avaient tous le même coefficient de dilatation. Mais on a reconnu, depuis quelques années, que les coefficients de dilatation des divers gaz présentent de légères différences. Toutefois, celles-ci sont assez faibles pour qu'on puisse admettre que tous les gaz ont le même coefficient de dilatation, lequel a été trouvé être de 366 cent millièmes; ce qui veut dire que 100000 litres d'air, ou de tout autre gaz, en s'échauffant d'un degré, prennent un accroissement de volume de 366 litres. C'est une dilatation huit fois plus grande que celle de l'eau.

207. **Applications nombreuses de la dilatation des gaz.** — La dilatation des gaz nous offre des applications importantes, non-seulement dans l'économie domestique, mais dans les phénomènes atmosphériques. Par exemple, dans nos habitations, lorsque l'air est échauffé et vicié par la présence d'un grand nombre de personnes, il se dilate et s'élève, en vertu de sa moindre densité, dans la partie la plus haute des appartements; et c'est pour lui donner une issue qu'on pose dans le haut des croisées des vasistas par

lesquels l'air chaud se dégage, tandis que de l'air frais et pur rentre par les joints des portes et des croisées.

Dans les théâtres, les spectateurs placés aux dernières galeries ont beaucoup à souffrir de la haute température de l'air qui se porte aux parties les plus élevées de la salle, tandis que ceux qui sont placés à l'orchestre respirent un air frais.

Les bouches de chaleur qu'on place sur les poêles sont une application de la dilatation des gaz. L'air, entrant par la partie inférieure, circule dans des conduits pratiqués dans les parois, s'y échauffe, et de là s'échappe dans l'appartement. Il en est de même des bouches de chaleur desquelles se dégage, dans les grands établissements, de l'air chauffé au moyen de calorifères placés dans les parties inférieures des édifices, ordinairement dans les caves.

C'est encore à la dilatation de l'air par la chaleur qu'est dû le tirage de nos cheminées. Échauffé par les combustibles qui brûlent dans le foyer, l'air s'élève dans le tuyau avec une vitesse d'autant plus grande qu'il est plus dilaté; d'où résulte un courant d'air rapide qui entretient et active la combustion en renouvelant constamment l'oxygène absorbé.

Si l'on étudie les effets produits dans l'atmosphère par les dilatations et les contractions de l'air, on y reconnaît la cause de phénomènes qui exercent une influence immense sur le bien-être de tout ce qui vit à la surface du globe. Par exemple, lorsque le sol est fortement échauffé par les rayons ardents du soleil, les couches d'air en contact avec lui tendent à prendre la même température et à former ainsi une atmosphère tout à fait suffocante; mais ces couches se dilatant de plus en plus, s'élèvent en vertu de leur plus grande légèreté, tandis que les couches supérieures, plus froides et plus denses, viennent successivement les remplacer. De la sorte, la haute température qui tend à se produire dans les basses régions de l'air, se trouve considérablement tempérée et ne dépasse pas les limites qui permettent aux plantes et aux animaux de la supporter.

Enfin, ce sont les dilatations et les contractions qui se produisent dans l'atmosphère, sur une grande étendue de pays, qui sont la cause des vents, depuis le zéphyr le plus léger jusqu'à l'ouragan le plus violent. Or, les vents, si redoutables quelquefois, si capri-

cieux dans leur direction, si variables dans leur intensité, n'ont pas seulement pour effet de mélanger les parties les plus chaudes de l'atmosphère avec les plus froides, et de modérer ainsi les températures trop élevées et les froids trop intenses, mais chassant l'air vicié de nos villes et le remplaçant par de l'air pur, ils sont une des principales sources de salubrité; sans eux nos cités seraient des foyers d'infection où la peste et les épidémies de toute nature seraient à l'état permanent. Sans les vents, les nuages restant immobiles au-dessus de la contrée qui les aurait vus naître, la plus grande partie du globe serait condamnée à une aridité absolue, et ni rivières ni ruisseaux n'arroseraient le sol. Au contraire, emportés par les vents, les nuages qui se sont formés au-dessus des mers sont entraînés jusqu'au centre des continents, s'y résolvent en pluies, et celles-ci, après avoir fertilisé le sol, donnent naissance à ces fleuves nombreux qui se jettent dans les divers océans, formant ainsi une circulation continue des mers vers les continents et des continents vers les mers.

208. **Densité des gaz.** — On sait que les densités des solides et des liquides ont été déterminées par rapport à l'eau (93); celles des gaz l'ont été par rapport à l'air; c'est-à-dire qu'ayant pris pour terme de comparaison, pour *unité*, le poids d'un certain volume d'air, on a cherché combien, à volume égal, pesaient les autres gaz. Mais ces corps étant très-compressibles, très-dilatables, et, par suite, leurs densités pouvant varier beaucoup, on a dû les considérer à une température et à une pression déterminées; c'est pourquoi on a choisi la température zéro et la pression 76 (108). En résumé, la densité d'un gaz est donc, à volume égal, le rapport de son poids à celui de l'air, tous les deux étant à la température zéro et à la pression 76.

Pour obtenir la densité d'un gaz, de l'oxygène par exemple, on prend un ballon de verre à robinet, semblable à celui représenté dans la figure 71 (page 115); puis on le pèse successivement plein d'air, plein d'oxygène, et vide. Retranchant ensuite des deux premières pesées le poids du ballon vide, on a pour restes ceux de l'air et de l'oxygène contenus successivement dans le ballon. Divisant enfin le second poids par le premier, on a la densité cherchée. D'après ce qui a été dit ci-dessus, ces pesées doivent être

faites à zéro et à la pression 76; sinon il y aurait à opérer des corrections qui ne peuvent se faire que par le calcul.

C'est en procédant comme il vient d'être dit, qu'on a trouvé les densités suivantes:

Densités des gaz.

Air..........	1,0000	Oxygène........	1,1056
Hydrogène.......	0,0692	Acide carbonique...	1,5290
Azote.........	0,9714	Chlore.........	3,44..

D'après les nombres ci-dessus, le plus léger des gaz et, par suite, de tous les corps, est l'hydrogène, dont la densité est quatorze fois et demie moindre que celle de l'air.

CHAPITRE VI.

CHANGEMENTS D'ÉTAT DES CORPS PAR L'ACTION DE LA CHALEUR.

209. Fusion. — En traitant des effets généraux du calorique (174), on a vu que son action ne consiste pas seulement à dilater les corps, mais aussi à les faire passer de l'état solide à l'état liquide, ou de ce dernier état au premier, selon que la température s'élève ou s'abaisse; puis de l'état liquide à l'état aériforme, ou réciproquement. Ce sont ces divers changements d'état qui vont être étudiés sous les noms de fusion, de solidification, de vaporisation et de liquéfaction.

On appelle *fusion* le passage d'un corps solide à l'état liquide par l'action de la chaleur. Ce phénomène se produit lorsque la force de cohésion qui unit les molécules se trouve balancée par la force de répulsion du calorique (4); mais comme la cohésion varie d'une substance à une autre, il en est de même de la tem-

pérature à laquelle s'opère la fusion. Pour certaines substances, cette température est très-basse, tandis que pour d'autres elle est très-élevée, comme le montre le tableau suivant.

Températures de fusion.

Le mercure	—40°	Le bismuth	264°
La glace	0.	Le plomb	335.
Le suif	33.	L'antimoine	450.
La cire blanche	65.	Le zinc	500.
Le soufre	111.	L'argent	1000.
L'étain	228.	L'or	1200.

Tous les corps ne se fondent point par l'action de la chaleur; beaucoup sont décomposés : tels sont le papier, le bois, la laine, les os, le marbre, etc. Les corps simples, qui ne peuvent être décomposés, puisqu'ils ne contiennent qu'une seule substance, sont tous fondus par la chaleur, un seul excepté, qui a résisté jusqu'ici aux températures les plus élevées, c'est le carbone.

210. **Calorique latent absorbé pendant la fusion.** — Les corps qui se fondent présentent tous ce phénomène remarquable que du moment qu'ils ont atteint leur température de fusion, ils ne s'échauffent pas davantage jusqu'à ce que la fusion soit complète. Par exemple, la glace fondant à zéro, un morceau de cette substance, exposé aux rayons solaires ou devant un foyer, ne pourra être chauffé au delà de cette température. S'il est soumis à un foyer plus intense, la fusion s'accélérera, mais sa température sera toujours zéro jusqu'à ce que tout le morceau de glace soit fondu. On conclut de là que tout le calorique qui s'ajoute à celui que possède un corps qui se fond est employé en entier à le liquéfier, mais n'a aucune action pour élever sa température. Pour exprimer que la chaleur ainsi absorbée pendant la fusion est pour ainsi dire cachée dans le liquide, puisqu'elle n'agit ni sur le thermomètre, ni sur nos organes, on lui a donné le nom de chaleur *latente*, d'un mot latin qui signifie *caché*.

L'expérience suivante met en évidence l'existence du calorique

latent : on prend 1 kilog. de glace pilée, à la température zéro, et on verse dessus 1 kilog. d'eau chauffée à 79°. Or, la glace se fondant très-rapidement, on a un mélange de 2 kilog. d'eau, mais qui au lieu d'être à une température moyenne entre celles de la glace et de l'eau chaude, *est tout entier à zéro*. Le kilogramme de glace à zéro s'est donc transformé en un kilogramme d'eau aussi à zéro; mais comme l'eau chaude elle-même s'est abaissée à cette température, que sont devenus les 79 degrés de chaleur qu'elle possédait? Ils existent encore tout entiers dans l'eau à zéro, mais sans l'échauffer, ni la dilater, n'ayant d'autre effet que de lui communiquer la fluidité. Cette expérience nous montre donc qu'un kilogramme de glace, pour se fondre, absorbe, à l'état latent, la quantité de chaleur nécessaire pour élever 1 kilog. d'eau de zéro à 79°; d'où l'on dit que le *calorique de fusion de la glace*, ou, ce qui est la même chose, le *calorique latent de l'eau*, est 79. Tous les corps qui se fondent absorbent ainsi, à l'état latent, une quantité de chaleur plus ou moins considérable, mais variable d'une substance à une autre.

L'énorme quantité de chaleur absorbée par la glace qui se fond nous explique comment on voit souvent des masses de glace un peu considérables se conserver longtemps après le dégel. Réciproquement, c'est la chaleur latente contenue dans l'eau qui fait que celle-ci, quoique refroidie à zéro, demande, sous un volume un peu grand, un temps assez long pour se congeler en entier; en effet, la congélation ne peut s'opérer qu'autant que les 79 degrés de chaleur contenus dans l'eau passent de l'état latent à l'état sensible, et deviennent ainsi une cause d'échauffement qui retarde la formation de la glace.

211. **Congélation.** — Les mêmes substances qui se liquéfient par la chaleur reviennent à l'état solide par le refroidissement, et c'est ce retour à leur premier état qu'on désigne sous le nom de *congélation* ou de *solidification*. Pour chaque substance la température à laquelle commence la solidification est précisément celle à laquelle s'opère la fusion. Par exemple, le soufre commençant à fondre à 111 degrés, réciproquement du soufre fondu qui se refroidit, commence à se solidifier à 111 degrés. De plus, jusqu'à ce que la congélation soit complète, la température du soufre reste con-

stante, c'est-à-dire invariable à 111°; ce qui provient de ce que le liquide, à mesure qu'il se congèle, restitue le calorique latent qu'il avait absorbé pour se fondre. Le même phénomène se remarque toutes les fois qu'un liquide se congèle.

Plusieurs liquides, comme l'alcool, l'éther, ne se solidifient pas par les plus grands froids auxquels on ait pu les soumettre. L'eau pure se solidifie à zéro; l'eau salée des mers à — 2°,5; les huiles d'olive et de colza à — 6°; celles de lin et de noix à — 27°.

L'eau présente ce phénomène remarquable qu'en se solidifiant pour former de la glace, son volume s'accroît d'une manière notable. Or, on a déjà vu, en parlant du maximum de densité de l'eau (205), que celle-ci, en se refroidissant, se dilate depuis 4 degrés jusqu'à zéro; c'est donc cette dilatation qui se continue encore au moment de la congélation. L'accroissement de volume qui se manifeste ainsi au moment de la congélation de l'eau donne naissance à une force expansive considérable qui peut faire éclater les vases les plus résistants. C'est pour cette raison que, dans les temps de gelée, on doit éviter avec soin de laisser séjourner l'eau dans les bassins, dans les cuves, dans les tuyaux de conduite, en un mot dans tous les appareils qui pourraient être brisés par la glace.

D'après la dilatation qu'éprouve l'eau en se congelant, il est évident que la glace doit être moins dense que l'eau; c'est en effet ce qui a lieu, et c'est pourquoi les glaçons qui se forment sur les rivières flottent à leur surface. Dans les mers polaires, où la température est toujours très-basse, on rencontre des amas de glace flottante qu'on a nommes *champs de glace;* ils s'élèvent de 2 à 3 mètres hors de la mer, où ils plongent de 5 à 6 mètres, et ils s'étendent quelquefois jusqu'à 60 kilomètres. On voit aussi flotter sur ces mers de véritables montagnes de glace, qui n'ont pas la même étendue, mais qui atteignent des hauteurs considérables.

212. **Cristallisation.** — Lorsque les corps passent lentement de l'état liquide à l'état solide, leurs molécules, au lieu de se grouper d'une manière confuse, affectent en général une disposition régulière, en vertu de laquelle ces corps prennent des formes géométriques de cubes, de pyramides, de prismes, qui sont parfaitement

déterminées et qu'on désigne sous le nom de *cristaux*. Les flocons de neige, lorsqu'on les observe à la loupe, la glace naissante, le sucre candi, le cristal de roche, l'alun, le sel marin et beaucoup d'autres, nous offrent des exemples bien connus de cristallisation.

On distingue deux procédés principaux pour faire cristalliser les corps : par *voie sèche* et par *voie humide*. Dans le premier procédé, on fait fondre les corps par l'action de la chaleur, puis on les laisse refroidir lentement. Le vase dans lequel est le corps fondu se tapisse alors de cristaux, qu'on rend apparents en renversant le vase et en déversant l'excès de liquide avant que tout soit solidifié. On fait ainsi très-bien cristalliser le soufre, le bismuth et beaucoup d'autres métaux. Le second procédé consiste à faire dissoudre dans l'eau le corps qu'on veut faire cristalliser, puis à faire évaporer lentement le liquide. Le corps dissous se dépose sur les parois du vase, en donnant naissance à des cristaux d'autant mieux formés et d'autant plus gros que la cristallisation s'est opérée plus lentement. C'est ainsi qu'on fait cristalliser le sucre et les sels.

213. **Mélanges réfrigérants.** — L'absorption de calorique qui a lieu dans le passage de l'état solide à l'état liquide (210) est utilisée fréquemment dans les laboratoires et dans l'industrie pour produire des froids artificiels intenses. On obtient ce résultat en mélangeant des substances qui ont une grande affinité les unes pour les autres, et dont une au moins est solide. Le mélange le plus généralement employé est celui qui est formé d'une partie de sel marin ordinaire et de deux parties de glace pilée ou de neige. Le sel et l'eau ayant une grande affinité l'un pour l'autre, mais la combinaison ne pouvant se faire qu'autant qu'ils sont à l'état liquide, ces deux corps se liquéfient en partie, et de là résulte un abaissement de température qui va de 17 à 19 degrés au-dessous de zéro. C'est ce procédé qui est employé par les glaciers pour préparer les glaces.

CHAPITRE VII

FORMATION DES VAPEURS, MESURE DE LEUR FORCE ÉLASTIQUE.

214. Vapeurs, liquides volatils et liquides fixes. — On a déjà vu (174) qu'on nomme *vapeurs* des fluides aériformes, dans lesquels se transforment les liquides par l'action du calorique. Elles sont incolores et invisibles comme l'air, et douées d'une *force expansive* ou *tension* qui, par une élévation de température suffisante, peut devenir considérable et bien supérieure à celle des gaz. Dans la nature, le nombre des vapeurs est fort limité; on ne rencontre même en grande masse que la vapeur d'eau, toujours abondamment répandue dans l'atmosphère, et la seule que les physiciens aient étudiée complétement, à cause du rôle important qu'elle joue dans un grand nombre de phénomènes.

Quant à la propriété de dégager des vapeurs, les liquides se divisent en deux classes : les liquides *volatils* et les liquides *fixes*. Les premiers sont ceux qui possèdent une tendance naturelle à se réduire en vapeur, même à la température ordinaire ou à des températures plus basses, ainsi que chacun a pu l'observer à l'égard de l'eau, de l'esprit-de-vin, de l'éther, du chloroforme, liquides qui disparaissent promptement lorsqu'on les laisse exposés à l'air dans des vases ouverts. C'est encore ce qui a lieu pour une famille nombreuse de liquides connus sous les noms d'*essences*, d'*huiles essentielles*, d'*huiles volatiles*, au nombre desquelles sont les essences de térébenthine, de lavande, de gérofle, de rose, de fleur d'oranger.

Les liquides fixes, au contraire, sont ceux qui ne donnent de vapeur à aucune température; ce sont les huiles grasses, comme celles d'olive, de poisson, etc. Fortement chauffées, ces huiles sont décomposées en donnant naissance à des produits gazeux qui se dégagent, mais elles n'émettent pas de vapeurs de même nature qu'elles. Il en est bien quelques-unes, connues sous le nom d'*huiles*

siccatives, qui s'épaississent à l'air, mais c'est en absorbant de l'oxygène et non par un effet de vaporisation.

Quelques substances donnent des vapeurs même à l'état solide. L'eau congelée nous en donne un exemple, comme on le remarque dans les hivers secs et froids, où la glace et la neige répandues dans les campagnes finissent par disparaître complétement sans qu'il y ait eu fusion. Le camphre et les corps odorants, en général, présentent le même phénomène, car les odeurs doivent sans doute être attribuées à des émanations matérielles comparables à des vapeurs extrêmement subtiles.

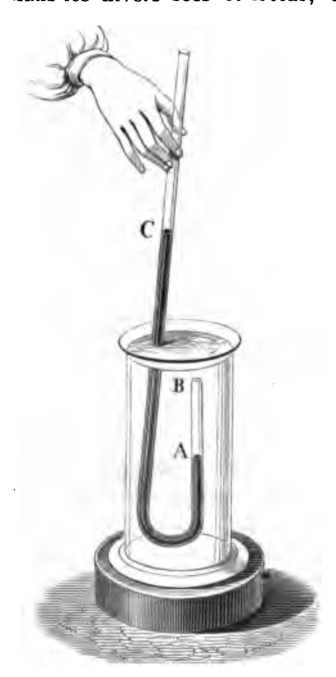


Fig. 145. — Formation lente des vapeurs.

215. Formation lente des vapeurs quand elles sont comprimées. — Les vapeurs qui se forment à la surface d'un liquide s'en dégagent en vertu de leur force élastique; mais cette force, à la température ordinaire, est en général de beaucoup inférieure à la pression de l'atmosphère, et c'est pour cela que ces liquides exposés à l'air ne se vaporisent que fort lentement.

L'expérience suivante rend sensible la force élastique des vapeurs et en même temps leur formation lente lorsqu'elles sont comprimées. On a un tube de verre recourbé en siphon dont la petite branche est fermée (fig. 145). Cette branche et une partie de la grande sont remplies de mercure; et dans la petite on fait passer d'avance une goutte d'éther, qui, en vertu de sa moindre densité, se rend à la partie la plus haute, en B. Le tube ainsi disposé, on le plonge dans un vase plein d'eau chauffée à 45 degrés environ. Aussitôt on voit le mercure s'abaisser graduellement dans la courte

branche et monter dans la grande, et cela par l'effet de la force expansive d'un gaz qui apparaît dans la partie AB, et qui a tout à fait l'apparence de l'air. Or, ce gaz, ce fluide aériforme, n'est autre chose que de la vapeur d'éther, dont la force élastique fait équilibre non-seulement à la pression atmosphérique qui s'exerce en C, mais à la pression exercée par la colonne de mercure qui remplit la grande branche, du sommet C jusqu'au niveau A.

Si l'on refroidit l'eau du vase, ou si l'on en retire le tube, ce qui revient au même, le mercure remonte progressivement dans la petite branche, la vapeur disparaît peu à peu, et la gouttelette d'éther, qui était en partie disparue, se reforme. Au contraire, si l'on chauffe davantage l'eau dans laquelle plonge le tube, le mercure descend davantage dans la petite branche, ce qui indique que la tension de la vapeur augmente avec la température, augmentation qui se manifeste indéfiniment tant qu'il reste du liquide à vaporiser.

C'est cette tension, qu'acquièrent les vapeurs à une haute température, qui souvent fait éclater les chaudières des machines à vapeur et occasionnent des sinistres redoutables. Si le bois petille au feu, c'est par suite de la tension des vapeurs et des gaz qui se forment dans les pores du bois pendant la combustion. Quand on fend des marrons pour les faire cuire sous la cendre ou dans une poêle percée de trous, c'est afin de laisser dégager la vapeur produite par l'eau contenue dans le fruit. Sans cette précaution, la vapeur retenue par l'enveloppe acquiert une tension capable de faire éclater le marron, et d'en projeter au loin les morceaux.

216. **Vaporisation instantanée dans le vide.** — On vient de voir que la formation des vapeurs est retardée par la pression atmosphérique; or, il n'en est plus ainsi dans le vide. La force élastique des vapeurs ne rencontrant alors aucune résistance, leur formation est instantanée. Pour le démontrer, on prend plusieurs tubes barométriques qu'on remplit de mercure et qu'on fait plonger, les uns à côté des autres, dans une même cuvette remplie de mercure, comme le montre la figure 146. Puis conservant un de ces tubes, le tube A par exemple, à l'état de baromètre ordinaire, c'est-à-dire ne contenant que du mercure sec, on fait passer quelques gouttes d'eau dans le tube B, quelques gouttes d'alcool dans

le tube C, et enfin quelques gouttes d'éther dans le tube D. Cela posé, on observe qu'à l'instant même où, dans chacun de ces tubes, le liquide pénètre dans le vide barométrique, le niveau du mercure s'abaisse, comme le montre la figure. Or, ce n'est pas le poids du liquide introduit qui déprime le mercure, car ce poids n'est qu'une fraction très-petite du poids du mercure déplacé. Il y a donc eu, pour chaque liquide, une production instantanée de vapeur, dont la force élastique a refoulé la colonne de mercure; et comme la dépression est plus grande dans le tube D que dans le tube C, et plus grande dans celui-ci que dans le tube B, on en conclut qu'à température égale, la force élastique de la vapeur d'éther est plus grande que celle de la vapeur d'alcool, et que la force élastique de cette dernière est supérieure à la force élastique de la vapeur d'eau. En mesurant la dépression au moyen d'une échelle graduée en millimètres, qui est placée entre les tubes, on trouve qu'à 20 degrés la force élastique de la vapeur d'éther est 25 fois plus grande que celle de la vapeur d'eau, et celle d'alcool à peu près 4 fois plus.

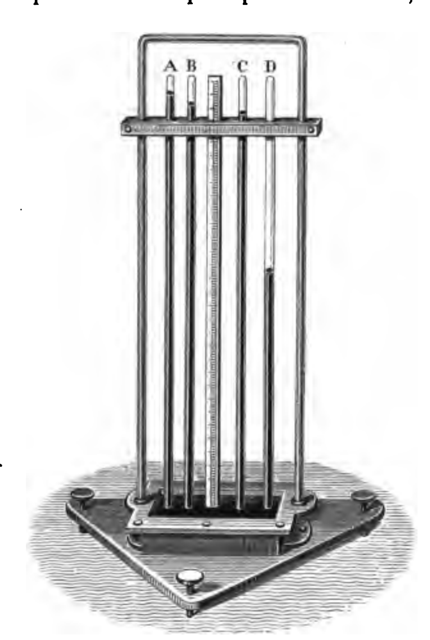


Fig. 146. — Vaporisation instantanée dans le vide.

217. Limite à la formation et à la tension des vapeurs, espace saturé. — La quantité de vapeur qui peut se former dans un espace donné, soit à la température ordinaire, soit à une température plus élevée, est toujours limitée. Par exemple, dans l'expérience

représentée ci-dessus (fig. 146), la dépression du mercure qui a lieu dans chacun des tubes B, C, D ne s'arrête pas faute de liquide qui puisse donner de nouvelles vapeurs, car on a soin d'en faire passer dans chacun d'eux assez pour que tout ne soit pas vaporisé. Ainsi dans le tube D il reste encore de l'éther; cependant, on attendrait en vain des mois et des années, si la température n'augmente pas, on verra toujours la portion d'éther liquide persister dans le tube, et le niveau du mercure rester stationnaire. Cela montre donc qu'il ne peut plus se former de nouvelles vapeurs dans le tube, et, en même temps, que la force élastique de celle qui s'y trouve ne peut plus augmenter, ce qu'on exprime en disant que cette vapeur a atteint son *maximum* de tension.

Lorsqu'un espace donné a pris ainsi toute la vapeur qu'il peut contenir, on dit qu'il est *saturé*. Par exemple, dans une bouteille pleine d'air sec, versez un peu d'eau, puis fermez hermétiquement avec un bouchon; une partie de l'eau se vaporisera lentement jusqu'à ce que la force élastique de la vapeur formée fasse équilibre à la force expansive de celle qui tend à se dégager encore; à ce moment toute formation de vapeur cesse et la capacité de la bouteille est saturée.

218. La quantité de vapeur qui sature un espace vide ou contenant de l'air est la même. — Un fait remarquable, constaté par des expériences nombreuses, c'est qu'à température égale la quantité de vapeur nécessaire pour saturer un espace déterminé est la même, que cet espace soit vide ou contienne déjà de l'air ou tout autre gaz. Ainsi, dans la bouteille ci-dessus, qu'elle soit pleine d'air ou qu'on y ait fait le vide, le poids total d'eau qui s'y vaporise est exactement le même; seulement, dans le premier cas, la saturation ne s'opère que lentement, tandis que dans le second elle se produit instantanément. Mais, à espace égal, vide ou plein d'air, la quantité de vapeur qui correspond à la saturation varie avec la température. Plus celle-ci est élevée, plus le même espace saturé contient de vapeur, et, par suite, plus celle-ci est dense; au contraire, plus la température est basse, moins il faut de vapeur pour saturer un espace donné.

La quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air est très-variable; mais malgré l'abondante vaporisation qui se produit à la surface

des mers, des lacs et des fleuves, l'air, dans les basses régions de l'atmosphère, n'est jamais saturé, même lorsqu'il pleut. Cela résulte de ce que la vapeur d'eau étant moins dense que l'air, à mesure qu'elle se forme, elle s'élève dans les hautes régions de l'atmosphère, d'où, condensée par le refroidissement, elle retombe plus tard en pluie.

219. **Évaporation, causes qui l'accélèrent.** — Nous avons désigné jusqu'ici sous la dénomination générale de ***vaporisation*** toute production de vapeur, dans quelque condition qu'elle ait lieu, lente ou rapide, dans l'air ou dans le vide; tandis qu'on donne spécialement le nom d'***évaporation*** à la formation lente de vapeur qui se forme à la surface d'un liquide volatil lorsqu'il est exposé à l'air libre. Par exemple, c'est par l'effet de l'évaporation que le niveau baisse successivement dans un bassin plein d'eau, et que celui-ci finit par se vider s'il n'est pas alimenté par une source. C'est par la même cause que la terre mouillée par les pluies se dessèche et durcit à l'air; que les étoffes tendues sur des cordes sèchent rapidement.

Plusieurs causes favorisent l'évaporation : ce sont l'élévation de température, la diminution de pression, le renouvellement de l'air au-dessus du liquide qui se vaporise, et enfin l'étendue de la surface que celui-ci présente au contact de l'air.

Influence de la température. — La force répulsive que le calorique exerce entre les molécules des corps augmentant avec la température, il en est nécessairement de même de la quantité de vapeur qui se dégage. Cette propriété est utilisée dans les arts pour hâter et compléter la dessiccation d'un grand nombre de produits qu'on expose dans des ***étuves***, c'est-à-dire dans des chambres dont la température est entretenue à 30, 40, 50 et même 60 degrés, et dont l'air se renouvelle constamment pour donner issue aux vapeurs qui se dégagent.

Influence de la pression. — Comme on a vu (215) que la pression atmosphérique est un obstacle au dégagement des vapeurs, on conçoit que lorsque cette pression diminue, elles doivent se former plus abondamment. C'est en effet ce qui arrive toutes les fois qu'on soustrait les liquides à la pression de l'air. Dans les raffineries de sucre, par exemple, afin de concentrer les sirops,

c'est-à-dire afin d'en réduire le volume en leur enlevant une partie de l'eau qu'ils contiennent, on les renferme dans de vastes chaudières de forme sphérique et chauffées; puis, à l'aide d'une puissante machine pneumatique mue par un moteur à vapeur, on raréfie l'air dans ces chaudières, ce qui accélère considérablement l'évaporation de l'eau, et amène promptement les sirops au degré de concentration voulu.

Influence du renouvellement de l'air. — Le renouvellement de l'air est indispensable, car si la même couche d'air restait toujours en contact avec la surface du liquide, elle se saturerait et toute évaporation serait impossible (217). C'est parce que le vent, lorsqu'il souffle, entraîne les couches d'air en contact avec le sol, que les pavés de nos rues et la boue des chemins sèchent rapidement après la pluie. C'est par la même raison que la dessiccation du linge étendu à l'extérieur s'opère bien plus rapidement dans un air agité que dans un air calme.

Influence de l'étendue du liquide. — Plus un liquide présente de surface à l'air, plus sont multipliés les points desquels se dégage la vapeur : par conséquent, toutes les fois qu'on a un liquide à faire évaporer, on doit le placer dans des vases larges et peu profonds. C'est ce qu'on pratique dans les *marais salants* où l'on extrait le sel en dissolution dans l'eau de mer. On fait arriver celle-ci dans des *aires* larges et peu profondes qu'on creuse dans le sol. Là, sous l'influence de la chaleur solaire, l'eau s'évapore lentement, et lorsque sa concentration est arrivée au point de laisser déposer le sel, on le voit cristalliser à la surface, en formant une croûte solide qu'on brise et qu'on recueille.

220. Ébullition. — L'*ébullition* est un dégagement rapide de vapeurs qui se forment en bulles au sein même des liquides chauffés à leur partie inférieure, tandis que l'évaporation n'a lieu qu'à la surface.

Lorsqu'on chauffe de l'eau, les premières bulles qui apparaissent sont dues à de l'air qui était mélangé avec le liquide, et qui s'en échappe en vertu de sa force élastique. Puis bientôt des couches les plus chaudes du liquide se dégagent des bulles de vapeur qui, rencontrant d'abord des couches moins chaudes que celles qui les émettent, se condensent avant d'atteindre la surface; et c'est à

cette formation et à cette condensation successives de vapeurs qu'est dû le frémissement qui précède l'ébullition. Une fois que les couches supérieures du liquide ont atteint une température assez élevée, les bulles de vapeur ne se condensent plus, et c'est alors qu'elles viennent crever à la surface en agitant toute la masse de l'eau, ce qui constitue le phénomène de l'ébullition (fig. 147).



Fig. 147. — Ébullition.

L'ébullition présente toujours les deux lois suivantes :

1° A la pression ordinaire de l'atmosphère, c'est-à-dire quand la hauteur du baromètre est de 76 centimètres, ***chaque liquide entre en ébullition à une température déterminée, qui lui est propre, et qui varie d'un liquide à un autre.*** Par exemple, l'éther bout à 37 degrés, l'alcool à 79, l'eau distillée à 100, le mercure à 350. Dans tous les cas, un liquide n'entre en ébullition qu'à l'instant où sa vapeur acquiert une tension égale à la pression qu'il supporte.

2° ***La température ne change pas tout le temps que dure l'ébullition.*** Par exemple, l'eau distillée bouillant à 100 degrés, on tenterait en vain de la chauffer davantage; quelle que fût l'intensité du foyer, un thermomètre plongé dans l'eau marquerait constamment 100; ce qui prouve que toute la chaleur qui passe du foyer dans la masse liquide est absorbée par la vapeur qui se dégage; et comme cette vapeur est elle-même à 100 degrés, il

faut en conclure que ce n'est pas pour échauffer la vapeur que le calorique est absorbé, mais seulement pour la produire, c'est-à-dire pour faire passer l'eau de l'état liquide à l'état de vapeur. Nous étudierons bientôt (224), sous le nom de ***calorique latent des vapeurs*** ou de ***calorique de vaporisation***, la chaleur qui disparaît ainsi pendant l'ébullition.

221. Causes qui font varier la température d'ébullition. — La température d'ébullition varie, pour un même liquide, avec les substances en dissolution dans le liquide, avec la pression plus ou moins forte à laquelle il est soumis, et enfin avec la nature des vases dans lesquels s'opère l'ébullition.

Influence des substances en dissolution. — Les matières en dissolution dans un liquide élèvent généralement sa température d'ébullition, à moins que ces matières ne soient elles-mêmes plus volatiles que le liquide; ainsi, l'eau qui bout à 100 degrés, quand elle est pure, ne bout qu'à 109 degrés quand elle est *saturée* de sel marin, c'est-à-dire quand elle a dissous de ce sel tout ce qu'elle peut en dissoudre. Les matières grasses combinées à l'eau élèvent aussi la température de l'ébullition; c'est pour cette raison que le bouillon gras bouillant brûle plus fortement que l'eau.

Influence de la pression. — Une cause qui modifie puissamment la température d'ébullition, c'est la pression qui s'exerce sur le liquide. En effet, plus celle-ci est forte, plus il faut à la vapeur une tension considérable pour se dégager, et, par suite, plus la température doit être élevée. Au contraire, plus la pression est faible, plus l'ébullition se produit à une basse température. L'eau entre même en ébullition à la température ordinaire lorsqu'on la soustrait à la pression atmosphérique. Pour cela, on dispose l'expérience comme le représente la figure 148; une coupe de verre remplie d'eau est placée sous la cloche d'une machine pneumatique; ou bien, afin que l'expérience soit visible pour un plus grand nombre de spectateurs, on place la cloche sur un plateau mobile, élevé sur une table, et communiquant avec la machine au moyen d'un tube de caoutchouc. Cela posé, aussitôt que le vide est fait, ou du moins que l'air est très-raréfié, on voit l'eau bouillir avec une grande force, ce qui indique un abondant dégagement de vapeur. Toutefois, cette ébullition n'est pas accompagnée d'une

élévation de température; au contraire, elle est une source de refroidissement puissant, à cause du calorique que les vapeurs absorbent à l'état latent pour se former (224).

On démontre encore la facilité avec laquelle les liquides entrent en ébullition, en l'absence de toute pression, au moyen d'un petit



Fig. 148. — Ébullition dans le vide.

appareil qu'on nomme ***bouillant de Franklin***, parce qu'il est dû à l'illustre physicien de ce nom. C'est un tube de verre deux fois recourbé, soudé d'un bout à une boule de même substance qu'on tient à la main, et de l'autre à un tube un peu gros, terminé en pointe effilée (fig. 149). Avant que l'appareil soit fermé, on y introduit de l'eau qu'on fait ensuite bouillir quelque temps en chauffant la boule à la flamme d'une lampe à alcool. Quand on juge que les vapeurs qui se dégagent ont entraîné tout l'air contenu

dans les tubes, on ferme la pointe effilée en la fondant à la flamme d'une lampe d'émailleur, dont la température est très-élevée. Il n'existe plus alors dans l'appareil d'autre pression que celle de la vapeur qui en sature la capacité, pression très-faible à la température ordinaire. Il en résulte que prenant la boule dans la main, comme le montre la figure, la chaleur ainsi transmise à l'eau suffit pour la faire bouillir avec force.

La pression de l'air diminuant à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère, on conçoit, d'après ce qui précède, que sur les hautes montagnes l'eau doit bouillir plus facilement qu'au niveau des mers. C'est, en effet, ce qu'on a constaté par l'expérience; sur le Mont-Blanc, par exemple, l'eau bout à 84 degrés. C'est évidemment là un obstacle à la cuisson des aliments; car des légumes, des fruits, ne peuvent cuire dans de l'eau à 84 degrés aussi bien que dans de l'eau à 100.

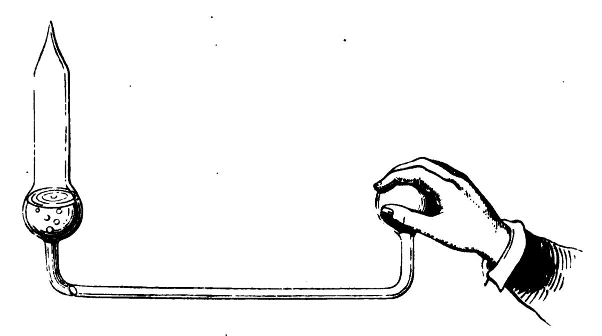


Fig. 149. — Bouillant de Franklin.

Dans les mines profondes, comme dans celles dont on extrait le charbon de terre en Belgique et en Angleterre, l'inverse a lieu : la pression croissant avec la profondeur, l'eau bout à plus de 100 degrés.

Influence de la nature des vases. — La substance des vases dans lesquels on fait bouillir l'eau peut aussi modifier sa température d'ébullition. Ainsi, quand la hauteur du baromètre est de 76 centimètres, ce n'est que dans un vase de métal que l'eau

distillée bout réellement à 100 degrés. Dans un vase de verre, elle ne bout qu'à 101 ou 102 degrés et même plus, ce qui est dû à l'affinité qui s'exerce entre le verre et l'eau. C'est pour tenir compte de cette influence des vases, que, dans la graduation des thermomètres, on détermine toujours le point fixe supérieur de l'échelle dans un vase de cuivre rouge ou de fer-blanc.

222. **Marmite de Papin.** — Tout ce qui a été dit jusqu'ici de la formation des vapeurs s'applique à des liquides chauffés en vase ouvert. Ce n'est que dans ce cas qu'il peut y avoir ébullition; car, en vase clos, les vapeurs ne pouvant se dissiper dans l'atmosphère, leur tension et leur densité vont croissant avec la température, mais le dégagement rapide qui constitue l'ébullition est impossible. De plus, il y a cette différence entre l'échauffement d'un liquide en vase ouvert et son échauffement en vase clos, que dans le premier cas la température du liquide ne peut dépasser celle de l'ébullition, tandis qu'en vase clos, elle peut s'élever pour ainsi dire indéfiniment. Par exemple, en vase ouvert et à la pression atmosphérique, on a vu (220) que l'eau ne peut être chauffée à plus de 100 degrés, toute la chaleur qu'on lui communique étant absorbée à l'état latent par les vapeurs qui se dégagent. Mais ce dégagement n'ayant plus lieu en vase clos, l'eau et la vapeur peuvent acquérir une température bien supérieure à 100 degrés. Toutefois, ce n'est pas sans danger, à cause de la tension considérable que prend alors la vapeur.

La figure 150 représente l'appareil dont on fait usage dans les cours de physique pour chauffer l'eau à plus de 100 degrés en vase clos. Cet appareil est connu sous le nom de *marmite de Papin*, parce qu'il est dû à Papin, médecin français, mort en 1710; il se compose d'un vase cylindrique M en bronze, d'un à deux litres de capacité, et fermé hermétiquement au moyen d'un couvercle serré par une vis de pression. Ce vase étant rempli d'eau à moitié environ, on le place sur un fourneau et on chauffe. La température du liquide peut alors dépasser de beaucoup celle d'ébullition, et la tension de la vapeur s'élève à plusieurs atmosphères. Toutefois, comme il importe que cette tension n'aille pas jusqu'à faire éclater le vase, Papin a ajouté à son appareil une *soupape de*

sûreté destinée à donner issue à la vapeur lorsqu'elle atteint une tension qu'il serait dangereux de dépasser.

Le mécanisme de cette soupape consiste en un levier *ab* chargé d'un poids *p* pouvant se déplacer le long du levier. La pression exercée par ce poids se transmet à un petit bouchon métallique qui s'engage dans une tubulure *u*, et en ferme le fond percé d'un trou pratiqué de part en part du couvercle. Cela posé, la tension de la vapeur tendant à soulever le petit bouchon métallique qui est dans la tubulure *u*, tandis que le poids *p* presse de haut en bas pour le fermer, il reste à régler la charge exercée par le levier de façon que le bouchon ne soit pas soulevé, ou du moins ne le soit que pour une tension déterminée, de 6 atmosphères par exemple. Or, on sait que la pression exercée par le poids *p* sur le fond de la tubulure *u* sera d'autant plus grande que le bras de levier *ad* le sera lui-même davantage (33); par conséquent, tout consiste à placer le poids *p* à une distance telle du point *a* qu'il exerce en *u* une pression de 5 atmosphères, laquelle ajoutée au poids de l'atmosphère que porte le bouchon, fera bien une pression totale de 6 atmosphères, limite que la force élastique de la vapeur dans l'appareil ne pourra dépasser, puisque aussitôt le levier étant soulevé, la vapeur se dégagera.

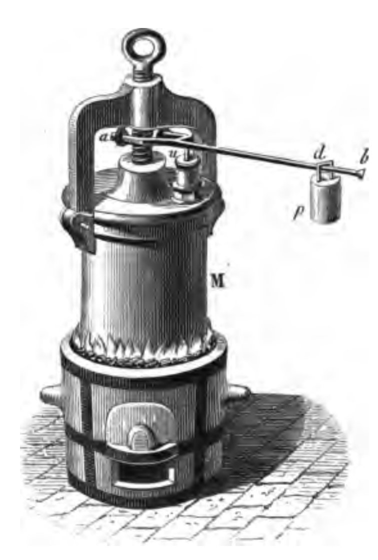


Fig. 150. — Marmite de Papin.

Lorsque la marmite de Papin a été suffisamment chauffée, et qu'on ouvre la soupape, un jet de vapeur s'élève instantanément à une grande hauteur avec un sifflement qui donne une idée de la tension; puis l'eau se refroidit à 100°, et il n'y a plus qu'une ébullition ordinaire.

L'appareil qui vient d'être décrit est désigné aussi sous le nom de *digesteur* de Papin, d'un mot latin qui veut dire *dissoudre*, parce que la haute température que peut prendre l'eau dans la marmite de Papin augmente beaucoup sa puissance dissolvante. Par exemple, on a utilisé le digesteur pour extraire des os la substance connue dans le commerce sous le nom de *gélatine*, laquelle on avait cru d'abord être douée de propriétés nutritives.

D'après l'énorme tension que peut acquérir la vapeur en vase clos, on conçoit l'importance de ne pas fermer hermétiquement des vases dans lesquels on fait chauffer de l'eau pour des usages domestiques. Par exemple, on doit déboucher, en les mettant devant le feu, les cruchons pleins d'eau destinés à chauffer les pieds des malades; autrement le vase peut éclater, ou tout au moins le bouchon serait lancé au loin avec projection d'eau chaude, ce qui occasionnerait des accidents graves. De même, lorsqu'une locomotive s'arrête, il importe de laisser perdre la vapeur, sinon celle-ci continuant à se produire dans la chaudière sans être consommée pour faire marcher la machine, elle finirait par acquérir une force élastique telle qu'il en résulterait une explosion.

223. **Mesure de la force élastique de la vapeur d'eau.** — Dalton, physicien anglais, mort en 1844, a mesuré la force élastique de la vapeur d'eau, de degré en degré, depuis zéro jusqu'à 100°, au moyen de l'appareil représenté dans la figure 151. Deux tubes barométriques, A et B, contenant du mercure, plongent dans une marmite de fonte, pleine du même liquide. Le baromètre A est un baromètre ordinaire exactement purgé d'air et d'humidité; mais dans le baromètre B on a fait passer, au haut de la colonne mercurielle, une petite quantité d'eau qui en se vaporisant déprime le mercure. Ces deux baromètres sont maintenus dans un long manchon de verre rempli d'eau dans laquelle plonge un thermomètre *t* destiné à en faire connaître la température. Cela posé, tout l'appareil étant placé sur un fourneau, comme le représente la figure, on chauffe graduellement; or, à mesure que la température s'élève, on voit le mercure s'abaisser lentement dans le baromètre B, ce qui prouve que l'eau qu'on y a fait passer donne des vapeurs dont la tension augmente avec la température. C'est la différence de niveau dans les deux baromètres qui indique cette tension. Par

exemple, si lorsque le thermomètre marque 70°, le mercure est plus bas dans le baromètre B que dans le baromètre A de 233 millimètres, ce qu'on reconnaît au moyen d'une échelle adaptée le long du manchon, cela montre qu'à 70° la tension de la vapeur d'eau est de 233 millimètres; ce qui veut dire qu'elle exerce sur les parois du vase qui la contient une pression égale au poids d'une colonne de mercure de 233 millimètres de hauteur.



Fig. 151. — Tube de Dalton.

C'est en notant ainsi, de degré en degré, la dépression du mercure dans le baromètre B. par rapport au baromètre A, que Dalton a déterminé la force élastique de la vapeur d'eau depuis 0 jusqu'à 100°. A cette dernière température, il a trouvé que la force élastique de cette vapeur est de 760 millimètres, ou 76 centimètres, c'est-à-dire d'une atmosphère; résultat conforme à ce qui a été dit en parlant de l'ébullition (220).

Depuis l'expérience de Dalton, deux physiciens français, Dulong et Arago, ont cherché la force élastique de la vapeur d'eau au-dessus de 100°, et ils ont trouvé que cette force étant d'une atmosphère à 100°, elle est de 2 atmosphères à 121°; de 3 atmosphères à 134°; de 4 atmosphères à 144°; de 5 atmosphères à 152°; d'où l'on voit que la tension de la vapeur croît beaucoup plus rapidement que la température.

224. Calorique latent des vapeurs. — On a vu en traitant de l'ébullition (220) que du moment où un liquide commence à

bouillir, sa température cesse de s'élever, quelle que soit l'intensité de la chaleur. Or, comme la vapeur qui se dégage alors est à la même température que le liquide, on en conclut que la chaleur absorbée par le liquide est tout entière employée à le vaporiser. C'est pourquoi on désigne cette quantité de chaleur sous le nom de *calorique latent de vaporisation*, de même qu'on a appelé *calorique latent de fusion* la chaleur absorbée à l'état latent pendant la fusion (210).

On a constaté par l'expérience que le calorique latent de la vapeur d'eau est 540; c'est-à-dire qu'un kilogramme d'eau à 100°, qui se vaporise pour donner un kilogramme de vapeur aussi à 100°, absorbe, uniquement pour changer d'état, la quantité de chaleur nécessaire pour élever 540 kilogrammes d'eau de 0 à 1°.

225. Exemples de froid produit par l'absorption du calorique à l'état latent. — La quantité de chaleur qui passe à l'état latent pendant la vaporisation peut devenir une cause de froid très-intense. Par exemple, qu'on verse quelques gouttes d'éther sur la main et qu'on agite celle-ci à l'air pour accélérer l'évaporation, on ressent un froid très-vif, occasionné par les vapeurs d'éther qui se produisent. Avec des liquides moins volatils que l'éther, comme l'alcool, l'eau, le même phénomène a lieu, mais le refroidissement est moins sensible.

Lorsqu'on sort du bain, surtout si c'est un bain en plein air et s'il fait du vent, on éprouve un froid très-piquant qui est occasionné par les vapeurs qui se forment sur tout le corps. Le linge humide est froid, parce que l'eau s'empare de la chaleur du corps pour s'évaporer.

Quoique le vent soit chaud l'été, il nous rafraîchit, parce qu'il active l'évaporation de la sueur. La fraîcheur que procure l'arrosage des rues est encore un effet de l'évaporation. C'est par la même cause que la pluie est suivie généralement d'un abaissement de température.

Les Espagnols, pour rafraîchir l'eau, la mettent dans des vases de faïence très-poreux qui permettent au liquide de suinter lentement à travers les pores. En suspendant ces vases, qu'on nomme *alcarazas*, dans un courant d'air qui accélère l'évaporation à l'extérieur, le vase se refroidit, et avec lui l'eau qu'il contient. On

obtient un effet semblable en enveloppant une bouteille remplie d'eau d'une serviette mouillée et en plaçant le tout dans un courant d'air.

226. Congélation de l'eau et du mercure dans le vide. — D'après l'énorme quantité de chaleur qui disparaît à l'état latent lorsqu'un liquide se vaporise, on prévoit qu'en accélérant l'évaporation, on a là une cause de refroidissement très-intense. Or, on a vu (216) que les liquides se vaporisent d'autant plus rapidement que la pression est plus faible. Par conséquent, si on place un vase d'eau dans le vide, il devra se refroidir très-rapidement. En effet, Leslie est parvenu à congeler ainsi de l'eau en quelques minutes. Pour faire cette expérience, on place sous le récipient de la machine pneumatique une capsule de métal, mince, très-peu profonde et à grand diamètre; puis à côté ou au-dessous, un vase rempli d'acide sulfurique très-concentré, liquide qui a une grande affinité pour l'eau, et qui est destiné à absorber les vapeurs. Cela posé, aussitôt qu'on fait le vide sous le récipient, l'eau entre en ébullition, et comme les vapeurs sont absorbées à mesure qu'elles se forment, l'espace ne pouvant se saturer, la vaporisation continue, ce qui amène un abaissement de température tel que bientôt on voit des cristaux de glace se former dans la capsule métallique.

En opérant avec des liquides plus volatils que l'eau, particulièrement avec celui qu'on connaît en chimie sous le nom d'*acide sulfureux*, lequel bout à 10° au-dessous de zéro, et que pour cette raison on n'obtient que difficilement à l'état liquide, on produit un froid assez intense pour congeler le mercure. Pour cela, on remplit de ce dernier une boule de verre semblable à celle d'un thermomètre, on l'enveloppe de coton qu'on arrose d'acide sulfureux, puis on place le tout sous le récipient de la machine pneumatique, et on fait le vide. En peu d'instants, refroidi par la vaporisation rapide de l'acide sulfureux, le mercure se congèle, et si l'on casse la boule de verre, on en retire une masse de mercure solide. ayant l'aspect du plomb, pouvant se forger et recevoir des empreintes; mais elle ne tarde pas à repasser à l'état liquide.

CHAPITRE VIII

LIQUÉFACTION DES VAPEURS ET DES GAZ, CHALEURS SPÉCIFIQUES.

227. Causes qui déterminent la condensation des vapeurs. — La *condensation* ou *liquéfaction* des vapeurs est leur retour de l'état aériforme à l'état liquide. Plusieurs causes peuvent déterminer la condensation des vapeurs, savoir : l'affinité chimique, l'excès de pression et le refroidissement.

Condensation par l'affinité chimique. — L'affinité de certaines substances pour l'eau suffit pour condenser les vapeurs qui sont dans l'atmosphère, lors même que celle-ci est loin d'en être saturée. En effet, lorsqu'on expose à l'air des substances avides d'eau, comme de la chaux vive, de la potasse, de l'acide sulfurique, en tout temps elles absorbent de la vapeur d'eau.

Condensation par la pression. — Concevons un vase clos contenant de la vapeur, un cylindre, par exemple, et dans ce cylindre un piston qu'on enfonce à volonté comme celui représenté dans la figure 4, page 13. Lorsque ce piston pénètre davantage dans le cylindre, il comprime la vapeur, mais celle-ci ne commence à se liquéfier qu'au moment où elle arrive à l'état de saturation (217) ; tant qu'elle n'est pas saturée, elle se comporte comme un véritable gaz, et la pression ne fait qu'augmenter sa densité et sa tension, sans la liquéfier. Or, à mesure que le piston s'abaisse, le volume de la vapeur devenant de plus en plus petit, il vient un moment où ce volume contient juste la quantité de vapeur nécessaire pour le saturer. A partir de cet instant, la plus légère augmentation de pression fait passer une portion de la vapeur à l'état liquide, et la liquéfaction se continue tant que dure l'excès de pression, en sorte que si le piston descend jusqu'au fond du cylindre, toute la vapeur est condensée. Dans cette expérience, il est à remarquer qu'une fois la saturation atteinte, s'il n'y a pas d'air dans le cylindre, la résistance à l'enfoncement du piston n'augmente plus

à mesure qu'il descend; ce qui résulte de la condensation de la vapeur, et confirme ce qu'on a vu précédemment sur le maximum de tension des vapeurs à l'état de saturation (217).

Condensation par le refroidissement. — Le refroidissement, de même que la pression, ne fait passer les vapeurs à l'état liquide qu'autant qu'elles sont à l'état de saturation. Mais une fois qu'un espace est saturé, le plus léger abaissement de température enlevant aux vapeurs le calorique qui leur donne la fluidité, l'affinité des molécules entre elles devient prépondérante, elles se rapprochent en gouttelettes extrêmement petites et flottent dans l'air, ou se déposent sur les corps environnants.

Dans les cas les plus ordinaires, les vapeurs se condensent par le refroidissement. Par exemple, celles qui s'exhalent de la bouche et des narines des animaux, saturent d'abord l'air plus froid au milieu duquel elles se dégagent, puis se condensent en prenant une apparence nuageuse. C'est par le même phénomène que deviennent visibles les vapeurs qui se dégagent de l'eau bouillante, celles qui s'élèvent au-dessus des cheminées, les brouillards qui se forment au-dessus des rivières. Toutes ces vapeurs sont plus apparentes en hiver qu'en été, parce que plus l'air est froid, plus la condensation est complète.

Pendant les temps froids, on voit, dans les appartements chauffés, les vitres se recouvrir, à l'intérieur, d'un dépôt de rosée. Or, l'air des appartements est loin, en général, d'être saturé de vapeur, mais les couches d'air en contact avec les croisées se refroidissent; et comme la quantité de vapeur nécessaire pour saturer un espace donné est d'autant moindre que cet espace est plus froid, il vient un moment où les couches ainsi en contact avec les vitres se trouvent saturées, et aussitôt les vapeurs qu'elles contiennent se déposent. Par un temps de dégel, quand l'air est plus chaud à l'extérieur qu'à l'intérieur, c'est sur la face extérieure des vitres que le dépôt se fait. C'est par la même cause qu'on voit alors les murs se recouvrir abondamment d'une couche d'humidité, ce qu'on exprime en disant qu'ils *suent;* expression impropre, car cette eau ne sort pas des murs, elle vient de l'atmosphère. C'est parce que les murs sont plus froids que l'air qu'ils abaissent la température des couches en contact avec eux et en condensent les vapeurs.

Enfin, un effet semblable se produit lorsqu'en été, une bouteille qu'on sort de la cave, une carafe qu'on remplit d'eau fraîche, se recouvrent d'un dépôt de rosée. Le même phénomène n'a pas lieu l'hiver, parce que la température de l'atmosphère étant égale à celle de la bouteille et de la carafe, ou plus basse, il n'y a plus refroidissement des couches d'air en contact avec elles.

228. **Calorique dégagé pendant la condensation.** — On a vu que tout liquide qui se vaporise absorbe à l'état latent une quantité de chaleur considérable; or, le calorique qui disparaît ainsi pendant la vaporisation n'est pas détruit, car, dans le changement inverse, il reparaît tout entier à l'état *sensible*, c'est-à-dire capable d'agir sur nos organes et sur le thermomètre. Par exemple, on sait qu'un kilogramme d'eau à 100 degrés absorbe pour se vaporiser 540 unités de chaleur (224), c'est-à-dire la quantité de chaleur nécessaire pour échauffer 540 kilogrammes d'eau de 0 à 1 degré; réciproquement, 1 kilogramme de vapeur à 100 degrés qui se liquéfie en donnant 1 kilogramme d'eau aussi à 100 degrés, fait passer 540 unités de chaleur de l'état latent à l'état sensible, chaleur qu'on utilise de la manière suivante.

229. **Chauffage à la vapeur.** — La quantité de chaleur qui redevient libre au moment de la condensation de la vapeur d'eau, a été utilisée dans l'industrie pour le chauffage des maisons particulières, des serres, des édifices publics. On produit la vapeur dans des chaudières semblables à celles des machines à vapeur; de là, la vapeur se rend dans des tubes de cuivre dissimulés derrière des tentures ou dans des colonnes servant en même temps à la décoration des appartements. En se condensant dans ces tubes, la vapeur leur cède une quantité de chaleur considérable qu'ils transmettent ensuite à l'air ambiant.

330. **Distillation, alambics.** — La *distillation* est une opération par laquelle on sépare un liquide volatil des substances qu'il tient en dissolution, ou bien deux liquides inégalement volatils. Cette opération consiste à vaporiser par l'action de la chaleur le liquide qu'on veut isoler, et à condenser ensuite les vapeurs en les refroidissant.

Les appareils qui servent à la distillation se nomment *alambics*. Ils se composent d'un vase A (fig. 152), en cuivre rouge étamé

à l'intérieur; c'est dans ce vase, qu'on appelle ***cucurbite***, qu'est le liquide à distiller. Au-dessus est le ***chapiteau*** B, qui lui sert de couvercle et par lequel se dégagent les vapeurs au moyen d'un long col C. Enfin, l'appareil est complété par un ***serpentin*** S, consistant en un long tube d'étain ou de cuivre étamé, enroulé en hélice et placé dans une cuve remplie d'eau froide.

Cela posé, la cucurbite étant chauffée sur un fourneau, les va-



Fig. 152. — Alambic.

peurs qui se dégagent se rendent dans le col du chapiteau, puis dans le serpentin; là, elles se condensent en se transformant en liquide qu'on recueille dans un vase D. Ce liquide ainsi obtenu est le même que celui qui est dans la cucurbite, mais privé de toutes les matières qu'il tenait en dissolution. Par exemple, si on distille de l'eau de rivière ou de puits, cette eau qui contient toujours plusieurs matières salines qu'elle dissout dans le sol, s'en sépare par la distillation, et on obtient de l'eau parfaitement pure.

C'est par la distillation qu'on fabrique les eaux-de-vie. Le vin étant un composé d'eau, d'alcool, et de matière colorante, lorsqu'on le chauffe dans un alambic à une température comprise

entre 78 et 100 degrés, l'alcool qui bout à 78 degrés se vaporise, tandis que l'eau, qui ne bout qu'à 100 degrés, reste, ou du moins ne se vaporise qu'en petite quantité. En recueillant le liquide résultant de la condensation des vapeurs, on a l'eau-de-vie ordinaire, qui n'est autre chose qu'un mélange d'alcool et d'eau.

Pendant la condensation des vapeurs dans le serpentin, une grande quantité de chaleur repassant de l'état latent à l'état sensible, l'eau de la cuve tend à s'échauffer promptement, ce qui finirait par rendre la condensation nulle. Pour obvier à cet inconvénient, un réservoir d'eau froide est élevé au-dessus de la cuve, comme on le voit dans la figure. De ce réservoir, l'eau est conduite à la partie inférieure de la cuve, tandis que l'eau chaude, moins dense, monte à la partie supérieure d'où elle s'écoule par un second tube qui la mène dans le sol.

231. **Liquéfaction des gaz.** — Les gaz, qui peuvent être comparés à de véritables vapeurs très-éloignées de l'état de saturation, sont, comme elles, susceptibles d'être liquéfiés. Du moins, ainsi qu'on l'a déjà vu (100), la plupart l'ont été, et il est bien probable que ceux qu'on n'a pu liquéfier, le seraient si l'on parvenait à les soumettre à une pression et à un refroidissement assez considérables.

L'expérience la plus remarquable sur la liquéfaction des gaz, est celle qui a été faite par Thilorier pour liquéfier et solidifier le gaz acide carbonique; expérience d'autant plus remarquable que c'est le gaz qui, en vertu de sa force expansive, se comprime lui-même à mesure qu'il se produit. L'appareil dans lequel on prépare l'acide carbonique se compose de deux cylindres de fonte, de 5 à 6 litres de capacité, et à parois très-épaisses. Ces deux cylindres, fermant hermétiquement, communiquent entre eux par un tube de plomb. Dans un des cylindres, qui est le *générateur*, sont les substances propres à donner naissance à un dégagement d'acide carbonique, ordinairement du bicarbonate de soude et de l'acide sulfurique. Dans le second cylindre, qui est le *récipient*, il n'y a rien; c'est là que se rend le gaz, et qu'il se comprime lui-même jusqu'à se liquéfier. On a ainsi préparé jusqu'à deux litres d'acide carbonique liquide.

A la température de 15 degrés, la tension du gaz comprimé

dans les cylindres est de 50 atmosphères, pression énorme qui peut faire éclater l'appareil, s'il n'est très-solidement construit : c'est ce qui est arrivé, il y a quelques années, à l'École de pharmacie de Paris, où le préparateur a été tué.

Pour obtenir l'acide carbonique solide, le cylindre qui sert de récipient est muni d'un robinet auquel est adapté un tube qui plonge dans l'acide liquide. En ouvrant ce robinet, l'acide carbonique liquide, refoulé par la pression, jaillit avec force ; mais passant alors de la pression de 50 atmosphères à celle d'une seule, une grande partie du liquide se vaporise, et le calorique latent absorbé par ce changement d'état est si considérable, qu'une portion de l'acide liquide est solidifiée par le refroidissement, et emportée par le jet de gaz en flocons blancs, cristallisés en forme filamenteuse comme l'amiante.

L'acide carbonique solide ne se vaporise que lentement. On a reconnu, à l'aide du thermomètre à alcool, que sa température est d'environ 80 degrés au-dessous de zéro. Placé sur la main, il ne produit pas une sensation de froid très-intense : cela provient de ce qu'il n'y a pas un contact parfait ; mais si on le mélange avec de l'éther, le froid est tellement intense qu'un flocon d'acide carbonique solide posé sur les chairs y produit la sensation d'une vive brûlure et y fait naître des ampoules comme le ferait le contact d'un corps incandescent.

CHALEURS SPÉCIFIQUES.

232. Chaleurs spécifiques des solides et des liquides. — Après avoir fait connaître l'action de la chaleur sur les corps pour les dilater, les liquéfier et les vaporiser, il reste à les comparer entre eux relativement aux quantités de chaleur qu'ils absorbent pour s'échauffer d'un même nombre de degrés. En effet, l'expérience a appris qu'il faut aux diverses substances des quantités de chaleur très-différentes pour élever leur température d'un nombre de degrés égal. Par exemple, sous le même poids et pour une même élévation de température, l'eau absorbe dix fois plus de chaleur que le fer et trente-trois fois plus que le mercure.

Cela posé, ne pouvant déterminer la quantité absolue de chaleur

que prennent les corps pour s'échauffer, on appelle ***chaleur spécifique*** ou ***capacité calorifique*** d'une substance, la quantité de chaleur qu'elle absorbe pour s'échauffer de 0 à 1°, comparativement à celle qu'absorberait, dans le même cas, un poids égal d'eau; ce qui revient à dire que prenant pour unité la chaleur nécessaire pour échauffer d'un degré un certain poids d'eau, un kilogramme, par exemple, on a cherché si le même poids des autres substances exigeait deux, trois fois plus ou moins de chaleur que l'eau pour s'échauffer aussi d'un degré.

Plusieurs méthodes ont été employées pour trouver les chaleurs spécifiques des solides et des liquides; les deux principales sont celle de la fusion de la glace et celle des mélanges.

La méthode de la fusion de la glace consiste à porter le corps dont on cherche le calorique spécifique à une température connue, à 100 degrés, par exemple, puis à le projeter rapidement dans de la glace. Une certaine portion de celle-ci étant fondue, par un calcul simple on déduit la chaleur spécifique cherchée du poids de la glace fondue, de celui du corps et de sa température au moment où il a été projeté dans la glace. Pour faciliter cette méthode, Lavoisier et Laplace, à la fin du siècle dernier, inventèrent un appareil connu sous le nom de ***calorimètre de glace***.

Dans la méthode des mélanges, on chauffe encore à une température connue la substance dont on veut avoir le calorique spécifique, puis on la projette dans de l'eau froide. Celle-ci s'échauffe en prenant de la chaleur à la substance, tandis que cette dernière se refroidit, et cela, jusqu'à ce qu'elles aient atteint toutes les deux la même température. C'est alors que de cette température commune, des poids respectifs de l'eau et de la substance, et enfin de leurs températures au moment où on les a mélangées, on déduit par le calcul la chaleur spécifique demandée.

Chaleurs spécifiques de diverses substances, celle de l'eau étant prise pour unité.

Eau.	1,000	Cuivre.	0,095
Verre.	0,198	Argent.	0,057
Fer	0,114	Mercure.	0,033
Zinc.	0,096	Platine	0,032

D'après ces nombres, on voit que de tous les corps c'est l'eau qui a la plus grande chaleur spécifique et qui, par suite, demande le plus de chaleur pour s'échauffer d'une quantité déterminée. Par exemple, si l'on plaçait dans un four à 100 degrés, un kilogramme d'eau et un kilogramme de fer, tous les deux à 15 degrés, les deux substances finiraient bien par atteindre la température du four, mais le fer exigeant environ onze fois moins de chaleur que l'eau, l'atteindrait plus tôt. Toutefois, le pouvoir absorbant des deux substances aurait aussi une grande influence sur le temps nécessaire à leur échauffement.

Nous ne parlerons point des chaleurs spécifiques des gaz; bornons-nous à dire qu'elles ont été déterminées par rapport à celle de l'air prise pour unité.

CHAPITRE IX

HYGROMÉTRIE, PLUIE, ROSÉE, VENTS.

233. **Objet de l'hygrométrie.** — L'*hygrométrie*, ainsi nommée de deux mots grecs qui signifient *mesure de l'humidité*, a pour objet de faire connaître le degré d'humidité de l'air, cette humidité étant caractérisée non pas précisément par la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère, mais par son plus ou moins de rapprochement du point de saturation (217), ce qui n'est pas la même chose. En effet, à quantité de vapeur égale, l'air est d'autant plus humide que la température est plus basse, car il est plus près d'être saturé et de laisser déposer les vapeurs qu'il tient en suspension. C'est pour cette raison que l'air est généralement plus humide l'hiver que l'été, quoique dans cette dernière saison l'atmosphère contienne fréquemment plus de vapeurs que l'hiver. C'est encore pour la même cause que la nuit l'air est plus humide que pendant le jour. En chauffant un appartement, il perd de son humidité, parce que les vapeurs qui s'y trouvent étant portées à une température plus élevée, elles sont plus loin de leur point de saturation.

La quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air varie beaucoup suivant les saisons, les climats, la température et diverses causes locales. En France, l'air n'est jamais complétement sec, ni complétement saturé, même dans les temps de pluie, mais en général à un état moyen entre l'extrême sécheresse et l'extrême humidité. Du reste, c'est ce degré moyen d'humidité qui convient le mieux à l'économie animale. Dans un air à l'état d'extrême sécheresse, l'exhalation par les pores de la peau, qui constitue la transpiration cutanée, est trop abondante, la peau se gerce et s'exfolie, et les animaux ont beaucoup à souffrir. Dans un air trop humide, la transpiration cutanée ne peut se produire, et il en résulte une perturbation qui peut déterminer la mort. Il importe donc de régler convenablement l'humidité des lieux qu'on habite, de manière à éviter également l'extrême sécheresse et l'extrême humidité. Aussi est-ce avec raison que l'hiver on pose sur les poêles des vases contenant de l'eau, car, dans ce genre de chauffage, l'air des appartements ne se renouvelant pas comme dans le chauffage par les cheminées, il tend à se dessécher de plus en plus à mesure qu'il est chauffé davantage, quoique la quantité de vapeur reste la même.

234. **Hygroscopes.** — Les instruments propres à indiquer l'humidité de l'air sont connus, les uns sous le nom d'***hygroscopes***, c'est-à-dire ***qui voit l'humidité***, les autres sous celui d'***hygromètres***, c'est-à-dire ***qui la mesure***. Toutes les substances qui absorbent l'humidité de l'air, comme le sel marin et beaucoup d'autres connus sous le nom de sels ***déliquescents***, peuvent servir d'hygroscopes. Il en est de même d'un grand nombre de substances végétales ou animales, comme le papier, le parchemin, les cheveux, les cordes de boyaux, etc., qui s'allongent par l'humidité et se resserrent par la sécheresse, donnant ainsi une indication du plus ou moins de vapeur contenue dans l'air.

On a imaginé un grand nombre d'hygroscopes dont le plus en usage est l'***hygroscope à torsion***, devenu populaire sous la forme d'***hygroscope-capucin***, representée dans la figure 153. Ce petit instrument se compose d'une planchette de bois fixée sur un pied et découpée en forme de personnage; la tête de celui-ci est garnie d'un capuchon de carton mince, mobile autour du point a, où il

est attaché à l'extrémité d'un petit bout de corde de boyau tordu; ce dernier, à son autre extrémité, est fixé derrière la planchette, dans une tubulure *o*, comme on le voit dans la coupe AB. Cela posé, la corde de boyau se tordant par la sécheresse et se détordant par l'humidité, elle entraîne avec elle le capuchon, qu'on a soin de disposer convenablement pour qu'il se trouve sur la tête du personnage quand l'air est humide, et en arrière quand l'air est sec.



Fig. 153. — Hygroscope.

Ces hygroscopes ne donnent que des indications peu exactes, et de plus ils sont ***paresseux***, c'est-à-dire que ce n'est qu'après un temps de sécheresse ou d'humidité assez prolongé qu'ils commencent à marcher; aussi n'ont-ils aucune valeur scientifique.

235. Hygromètre à cheveu. — Les physiciens ont inventé un assez grand nombre d'hygromètres; celui qui est généralement adopté est l'***hygromètre à cheveu***, qu'on désigne aussi sous le nom d'***hygromètre de Saussure***, parce qu'il est dû à ce physicien et naturaliste célèbre, mort à Genève, sa patrie, en 1799.

Cet instrument est fondé sur la propriété qu'ont les cheveux de s'allonger par l'humidité et de se raccourcir par la sécheresse. Il se compose d'un cadre de cuivre sur lequel est tendu un cheveu, comme nous le montre la figure 154. Ce cheveu, qui a environ 20 centimètres de longueur, est fixé à sa partie supérieure dans une pince; à sa partie inférieure, il s'enroule autour d'une poulie sur laquelle est un petit trou où s'engage le bout du cheveu. Sur la même poulie, qui est double, s'enroule, en sens contraire du cheveu, un fil de soie portant un poids P destiné à tendre le cheveu. Enfin, à l'axe de la poulie est fixee une longue aiguille qui

tourne avec elle et se meut devant un cadran dont on va voir ci-après la graduation; mais auparavant il importe de faire connaître la préparation qu'on fait subir au cheveu avant de le disposer comme il vient d'être dit.

Les cheveux étant naturellement imprégnés d'une matière grasse qui s'oppose à l'absorption de l'humidité, il est nécessaire de les dégraisser, ce qui s'obtient en les faisant bouillir dans de l'eau qui tient en dissolution un centième de son poids de carbonate de soude, sel qui entre dans la composition des savons. Le cheveu une fois dégraissé, on le lave dans l'eau distillée, on le fait sécher, puis on le fixe sur l'instrument.

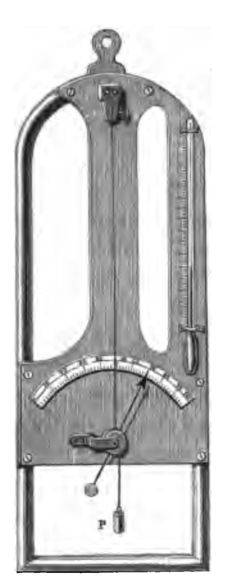


Fig. 154. — Hygromètre à cheveu.

Cela fait, il reste à graduer l'hygromètre. Pour opérer cette graduation, Saussure a adopté deux points fixes, correspondant, l'un à l'extrême sécheresse, l'autre à l'extrême humidité. On obtient le premier point, en plaçant l'instrument sous une cloche de verre dans laquelle on met en même temps des substances très-avides d'eau, comme de la chaux vive ou de l'acide sulfurique. L'air qui est sous la cloche perdant peu à peu son humidité, le cheveu se raccourcit et l'aiguille avance de droite à gauche dans le dessin ci-contre; au bout de quelques jours, elle devient stationnaire, et au point où elle s'arrête on marque zéro sur le cadran. On trouve ensuite le second point fixe en retirant les matières desséchantes de la cloche et en mouillant les parois de celle-ci; l'air se sature alors promptement, le cheveu s'allonge avec rapidité, l'aiguille avance de gauche à droite, et redevient stationnaire au bout de quelques heures. A son second point d'arrêt, on marque 100, et partageant enfin l'intervalle du 0 à 100 en cent parties égales, l'instrument est gradué.

L'hygromètre ainsi construit est très-sensible et indique rapide-

ment les variations d'humidité qui se produisent dans l'atmosphère, mais les nombres de degrés marqués par l'aiguille n'indiquent pas la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air. On va voir comment cette cause d'erreur a été corrigée par Gay-Lussac.

236. **État hygrométrique de l'air.** — On entend par *état hygrométrique* de l'air, non pas la quantité de vapeur d'eau qui s'y trouve en suspension, mais le rapport de la quantité de vapeur que l'air contient à celle qu'il contiendrait s'il était saturé; par exemple, si l'on dit que l'état hygrométrique *est trois cinquièmes*, cela exprime que l'air ne contient que les trois cinquièmes de la vapeur qu'il contiendrait à l'état de saturation.

Or, l'expérience a appris que l'hygromètre à cheveu décrit ci-dessus ne donne point l'état hygrométrique de l'air. En effet, dans une atmosphère à moitié saturée, l'aiguille, au lieu de marquer 50 degrés, qui est le milieu de la graduation, marque 72; de même quand l'air est au quart de sa saturation, l'hygromètre, au lieu de 25 degrés, marque 46; ce qui fait voir que les degrés de cet appareil sont loin d'être proportionnels aux quantités de vapeurs contenues dans l'air. Afin de corriger cette cause d'erreur, Gay-Lussac a cherché expérimentalement les états hygrométriques qui correspondent aux divers degrés de l'hygromètre à cheveu, et il a ensuite construit une table dans laquelle, en regard de chaque degré de cet instrument, est inscrit l'état hygrométrique correspondant.

NUAGES, BROUILLARDS, PLUIE, ROSÉE.

237. **Formation des nuages et des brouillards.** — Les *nuages* sont des amas de vapeurs condensées par le refroidissement dans les hautes régions de l'atmosphère. Pour nous rendre compte de leur formation, observons que l'air, lors même qu'il nous paraît parfaitement pur, est toujours un immense réservoir de vapeurs d'eau invisibles, résultant de l'évaporation qui se produit sans cesse à la surface des mers et des continents. La quantité de vapeur que l'air tient ainsi en suspension est d'autant plus abondante que la température est plus élevée. Dans nos climats, par exemple,

l'atmosphère contient en moyenne six fois plus de vapeur l'été que l'hiver. Or, si par une cause quelconque l'air se refroidit jusqu'à se saturer, les vapeurs se condensent et deviennent visibles en troublant la transparence de l'atmosphère.

Quant aux causes qui peuvent refroidir l'air pour amener la condensation des vapeurs, il en est plusieurs : les courants d'air chaud qui s'élèvent dans l'atmosphère (206) sont une des principales; en effet, l'air qui monte ainsi, subissant une pression de plus en plus faible, se dilate, et c'est cette dilatation qui, comme nous le verrons bientôt (249), est une source de froid intense qui suffit pour déterminer la formation des nuages. Les montagnes produisent le même effet en arrêtant les vents qui soufflent de la plaine et en les forçant à s'élever le long de leurs flancs. C'est pour cette raison qu'il pleut beaucoup sur les montagnes, et que les grands fleuves y prennent naissance. Un vent froid qui rencontre un courant d'air chaud et humide est encore une cause de refroidissement suffisante pour rendre les vapeurs apparentes.

Pour expliquer comment les nuages restent en suspension dans l'atmosphère, deux hypothèses ont été proposées par les physiciens. Dans l'une on admet que les vapeurs qui forment les nuages sont à l'*état vésiculaire*, c'est-à-dire sous forme de vésicules extrêmement petites, creuses comme des bulles de savon, et remplies d'un air saturé moins dense que l'air ambiant, ce qui leur permet de flotter dans l'atmosphère comme autant de petits ballons. Dans la seconde hypothèse, les nuages sont formés d'un amas de gouttelettes pleines, excessivement petites, qui restent en suspension dans l'air par suite de leur faible poids, de même qu'on y voit flotter les poussières légères entraînées par les vents. C'est cette dernière hypothèse qui est surtout adoptée aujourd'hui.

Les *brouillards* ne sont autre chose que des nuages qui occupent les basses régions de l'air, et comme eux ils résultent de la condensation des vapeurs atmosphériques par refroidissement. Par exemple, c'est ainsi que se forment les brouillards qui se répandent, après le coucher du soleil, au-dessus des rivières, des lacs et des prairies humides. En effet, l'eau se refroidissant moins vite que le sol par le rayonnement, à cause des courants descendants et ascendants qui se produisent dans sa masse (198), il en résulte qu'au-

dessus de l'eau, l'air se trouve à une température plus élevée qu'au-dessus du sol. Par suite, les deux masses d'air venant à se mélanger, il y a refroidissement et précipitation de vapeurs.

238. **De la pluie.** — La *pluie* est la chute des petites gouttelettes dont les nuages sont formés (237), lorsque ces gouttelettes en se réunissant entre elles acquièrent un poids trop considérable pour rester en suspension dans l'atmosphère. Du reste, la pluie se produit le plus souvent au moment même où les vapeurs se condensent dans les hautes régions de l'air, en sorte que ce ne sont pas en général les nuages qu'on voit flotter dans l'atmosphère qui donnent de la pluie. Le plus souvent, en s'abaissant par leur propre poids, ils traversent des couches d'air de plus en plus chaudes et s'y dissipent en vapeurs. C'est ainsi que dans l'été et l'automne, au milieu du jour, la sérénité succède aux brouillards et aux nuages de la matinée par suite du réchauffement général de l'atmosphère.

La quantité de pluie qui tombe dans une contrée dépend beaucoup du voisinage ou de l'éloignement des mers; on observe, en effet, que les pluies sont bien plus fréquentes sur les côtes que dans l'intérieur des continents. La quantité de pluie varie encore avec les saisons, et on remarque qu'en général elle augmente avec la température, ce qui provient évidemment d'une vaporisation plus active. Par exemple, à Paris, c'est l'hiver que la pluie est moins abondante, et l'été qu'elle l'est davantage; en effet, si l'on représente par 100 la quantité d'eau qui tombe à Paris pendant l'hiver, on trouve que celle qui tombe pendant l'été est égale à 150.

La quantité de pluie annuelle, dans une contrée, augmente à mesure qu'on se rapproche de l'équateur, comme on le voit dans le tableau suivant.

Hauteurs d'eau en mètres qui tombent annuellement.

Copenhague	$0^m,468$	Madère.	$0^m,767$
Paris.	$0^m,564$	La Havane.	$2^m,320$
Bordeaux.	$0^m,650$	Saint-Domingue. . . .	$2^m,730$

D'où l'on voit qu'à Saint-Domingue il tombe à peu près cinq fois plus d'eau qu'à Paris. Toutefois, ce tableau présente des exceptions nombreuses qui tiennent à des causes locales. Ainsi, à Nantes, qui est moins dans le sud que Bordeaux, il tombe 1^{m},292 d'eau par an, presque le triple qu'à Paris. En Égypte, au contraire, il ne pleut presque jamais.

239. **Rosée, serein.** — On sait qu'on désigne sous le nom de *rosée* les gouttelettes d'eau qui se déposent sur le sol et sur les plantes pendant les nuits calmes et sereines. C'est au printemps et à l'automne qu'on observe la rosée, principalement en rase campagne et sur les lieux élevés; dans les villes, près des maisons, sous les arbres, il y a peu ou point de rosée.

On a longtemps admis que la rosée était due à une pluie fine résultant du refroidissement de l'air. Quelques physiciens ont même prétendu qu'elle sortait de terre. Le docteur Wells, Écossais, mort en 1817, a reconnu, le premier, la fausseté de ces théories, en observant que la rosée ne se dépose pas également sur tous les corps, mais toujours sur ceux placés dans les conditions qui leur permettent de se refroidir davantage; et de là il a conclu la théorie suivante, la seule admise aujourd'hui.

La nuit, les corps qui sont à la surface du sol ne recevant plus de rayons solaires, se refroidissent de plus en plus en émettant vers les espaces célestes la chaleur qu'ils ont reçue pendant le jour. La température de ces corps s'abaissant ainsi de plusieurs degrés au-dessous de celle de l'atmosphère, il arrive que les couches d'air qui les entourent se refroidissent elles-mêmes assez pour se trouver saturées, et c'est alors que les vapeurs qu'elles tiennent en suspension se précipitent sous forme de gouttelettes.

D'après cette explication si simple de la rosée, on prévoit que celle-ci doit se déposer d'autant plus sur un corps qu'il se refroidit davantage par le rayonnement, c'est-à-dire qu'il a un plus grand pouvoir émissif (194). En effet, le dépôt de rosée est généralement nul sur les métaux, dont on sait que le pouvoir émissif est très-faible; tandis que ce dépôt est abondant sur la terre, le sable, le verre et les plantes, dont le pouvoir émissif est beaucoup plus grand. Sur certaines plantes potagères et sur les feuilles de chou surtout, la rosée est si abondante, qu'il en résulte non-seulement

des gouttelettes, mais de petites flaques d'eau qui remplissent la concavité des feuilles. L'influence du pouvoir émissif sur la formation de la rosée est facile à constater en exposant à l'air, pendant la nuit, une lame de verre et une feuille de métal : le dépôt sera abondant sur la première, nul sur la seconde. Le même effet aurait lieu pour une étoffe blanche et une étoffe noire.

L'état de l'atmosphère peut aussi favoriser la formation de la rosée ou s'y opposer. C'est quand le ciel est pur et l'air calme qu'il y a le plus de rosée; mais s'il y a des nuages, ceux-ci rayonnant vers la terre, le sol se refroidit moins et il n'y a pas de rosée. Un grand vent s'oppose aussi à sa formation, les couches d'air étant trop agitées pour avoir le temps de se refroidir par leur contact avec les corps; au contraire, un vent léger, surtout s'il est humide, favorise la formation de la rosée en renouvelant lentement l'air.

Le ***serein*** consiste en une petite pluie fine qui tombe pendant l'été, au coucher du soleil, sans qu'il y ait aucun nuage dans l'atmosphère. Il diffère donc de la rosée, puisqu'il résulte de la condensation des vapeurs dans l'atmosphère même et non à la surface du sol.

La ***gelée blanche***, qui se forme à l'entrée du printemps et à la fin de l'automne, est due à la même cause que la rosée, c'est-à-dire au refroidissement des corps par le rayonnement. Mais pour qu'elle se produise, il faut que les corps se refroidissent au-dessous de zéro.

240. Neige, grésil. — La ***neige*** est le résultat de la congélation de la vapeur d'eau dans les hautes régions de l'atmosphère, congélation qui s'opère en petits cristaux étoilés à trois ou six branches diversement ramifiées, mais toujours très-remarquables par leur régularité.

Lorsque la neige tombe, la température de l'air est voisine de zéro. Si l'atmosphère est à une température plus basse, la neige est moins abondante, parce que la quantité de vapeur contenue dans l'air est d'autant moindre que le froid est plus intense.

Il neige d'autant plus dans un lieu qu'il est plus voisin des pôles ou plus élevé au-dessus du niveau des mers. Vers les pôles, la terre est toute l'année couverte de neige; il en est de même sur les

hautes montagnes, où règnent des neiges perpétuelles, même sous la zone torride; seulement, la région des neiges perpétuelles est d'autant plus élevée qu'on avance davantage vers l'équateur. Dans la portion de la chaîne des Andes, située sous ce cercle, les neiges perpétuelles commencent à 4800 mètres au-dessus du niveau des mers; dans les Alpes, à 2670 mètres; et vers l'extrémité septentrionale de la Norvége, seulement à 1060 mètres.

Le *grésil* est un composé de petites aiguilles de glace serrées les unes contre les autres et enveloppées quelquefois d'une couche de glace transparente; il paraît être un état intermédiaire entre la neige et la grêle. Comme on admet en général que cette dernière a une origine électrique, nous n'en parlerons qu'en traitant de l'électricité.

DES VENTS EN GÉNÉRAL.

241. **Nomenclature des vents.** — Les *vents* sont des courants d'air plus ou moins rapides qui se produisent dans l'atmosphère. On les désigne en général par le nom du point de l'horizon d'où ils viennent. Ainsi les vents qui soufflent des quatre points cardinaux sont connus sous les noms de *vent du nord*, *vent du sud*, *vent d'est* et *vent d'ouest*. Entre ces quatre directions, on en compte quatre autres, auxquelles correspondent les vents de *nord-est*, de *nord-ouest*, de *sud-est* et de *sud-ouest*. Enfin, les marins partagent encore les intervalles entre ces huit vents en quatre parties égales, ce qui donne en tout 32 directions, dont le tracé est connu sous le nom de *rose des vents*. Sur terre, on ne considère que les huit vents principaux nommés ci-dessus, dont la direction se détermine au moyen de girouettes.

Dans nos climats, certains vents soufflent plus fréquemment que d'autres. A Paris et dans le nord de la France, le vent dominant est le vent d'ouest, qui souffle moyennement 70 jours par an; après lui viennent les vents de sud-ouest et de sud. Le vent le moins fréquent est le vent d'est, dont la moyenne est de 23 jours par an.

242. **Cause des vents.** — Les anciens croyaient que les vents étaient dus à des exhalaisons souterraines qui s'échappaient des

entrailles de la terre, et que certaines cavernes étaient destinées à leur donner une issue. D'après la fable, Éole, dieu des vents, avait sa demeure dans une île voisine de la Sicile, et là il les tenait renfermés ou les mettait en liberté, suivant son bon plaisir.

On a longtemps admis que tous les vents étaient le résultat d'une impulsion. Franklin, le même dont nous parlerons bientôt en traitant de l'électricité, constata, le premier, qu'il y a aussi des vents par aspiration, c'est-à-dire se propageant successivement en sens contraire à leur direction. Par exemple, quand on fait marcher un soufflet, il se produit deux vents, l'un dû à l'air qui entre dans le soufflet, c'est un vent par aspiration; l'autre dû à l'air qui sort, un vent par impulsion.

Dans tous les cas, les vents ont toujours pour cause des variations de température dans la masse de l'atmosphère, variations d'où résultent des dilatations et des contractions (207) qui en troublent l'équilibre, et donnent naissance aux courants d'air qui constituent les vents. Par exemple, si l'air s'échauffe sur une certaine étendue de pays plus que dans les contrées voisines, il se dilate, s'élève dans les hautes régions de l'atmosphère et s'écoule latéralement en produisant des vents soufflant des contrées chaudes vers les contrées froides, et agissant par impulsion. Au contraire, dans les parties inférieures de l'atmosphère, l'air arrivant des régions voisines pour remplacer celui qui s'est élevé, il en résulte des vents de direction contraire aux premiers; mais ici ce sont des vents par aspiration.

243. Vents réguliers, vents périodiques, vents variables. — Relativement à la fixité ou à la variabilité de leur direction, les vents se divisent en vents réguliers, vents périodiques et vents variables.

Vents réguliers. — On nomme vents réguliers des vents qui soufflent toute l'année dans la même direction. On ne les rencontre que dans la zone torride, où ils sont dirigés de l'est à l'ouest. Ils se désignent ordinairement sous le nom de vents *alizés*, d'un vieux mot français qui exprimait l'uniformité et la constance. Ils furent observés pour la première fois par Christophe Colomb, et effrayèrent vivement ses équipages, qui crurent d'abord à l'impossibilité de leur retour vers l'ancien monde.

Les vents alizés ne s'étendent qu'à 30 degrés environ des deux côtés de l'équateur, et ce n'est que sous ce cercle qu'ils se dirigent exactement de l'est à l'ouest; ils s'inclinent ensuite à mesure qu'on avance vers le nord ou vers le sud, et finissent par souffler du nord-est au sud-ouest dans l'hémisphère boréal, et du sud-est au nord-ouest dans l'hémisphère austral.

Vents périodiques. — Les vents périodiques sont des vents qui, par intervalles réguliers, soufflent tantôt dans une direction, tantôt dans la direction opposée; tels sont la *brise* et la *mousson*.

La brise est un vent modéré qui, sur les côtes, souffle de la mer vers la terre pendant le jour, et dans le sens opposé pendant la nuit. La brise de jour, ou *brise de mer* commence à se faire sentir quelques heures après le lever du soleil, se calme un peu avant son coucher et se change ensuite en brise de nuit ou *brise de terre*. C'est la brise de terre qui le matin pousse au large la barque du pêcheur, et, le soir, c'est la brise de mer qui la ramène au port.

La brise se fait sentir toute l'année dans la zone torride; mais dans les zones tempérées, elle ne souffle que dans la saison chaude, et on sait combien elle contribue alors à modérer les chaleurs accablantes de l'été.

On explique facilement la direction opposée de la brise de terre et de la brise de mer en observant que, le jour, le sol s'échauffe plus que l'eau de la mer; par suite, l'air se dilatant davantage sur le continent, il s'élève dans l'atmosphère, et c'est l'air plus dense qui arrive de la mer pour le remplacer, qui occasionne la brise de mer. La nuit, un effet inverse se produit, parce que le sol se refroidissant alors plus vite que la mer, c'est au-dessus de celle-ci que l'air est plus chaud et s'élève.

On nomme *mousson*, d'un mot arabe qui veut dire *saison*, des vents qui soufflent six mois dans une direction et six mois dans la direction opposée. On les observe seulement sous la zone torride, et principalement sur les mers qui forment de vastes golfes, comme la mer d'Arabie, le golfe du Bengale, la mer de Chine. La mousson se dirige des mers vers les continents dans la saison d'éte, et en sens contraire pendant l'hiver.

Vents variables. — Les vents variables sont ceux qui soufflent tantôt dans une direction, tantôt dans une autre, sans qu'au-

cune loi régisse leurs changements de direction. Les vents deviennent d'autant plus variables qu'on s'éloigne davantage de la zone torride. Dans les zones tempérées, ils le sont déjà beaucoup, mais cette irrégularité augmente en avançant vers les zones glaciales, où il arrive fréquemment que le vent souffle à la fois de plusieurs points de l'horizon.

244. **Samoun, chamsin ou harmattan.** — Des déserts de l'Afrique et de l'Asie, il souffle pendant certains mois de l'année des vents extrêmement chauds et secs, lesquels entraînent avec eux des tourbillons d'un sable fin et brûlant qui obscurcissent l'atmosphère et interceptent les rayons du soleil. Lorsque ces vents règnent, la respiration s'accélère, la soif devient ardente, les yeux et les lèvres sont douloureux, et si l'on n'a pas soin de se frotter le corps avec de la graisse pour diminuer l'évaporation à la surface de la peau, elle se dessèche et se pèle.

En Égypte, le vent chaud du désert se désigne sous le nom de *chamsin* d'un mot qui veut dire *cinquante*, parce qu'il dure ordinairement 50 jours, dont 25 environ avant l'équinoxe du printemps et 25 après. Le même vent est connu sous le nom d'*harmattan* sur les côtes de Guinée, et sous celui de *samoun* ou *simoun* sur les côtes de Barbarie. La température du samoun s'élève parfois jusqu'à 50°. Lorsque les caravanes sont surprises par ce vent, les hommes se couvrent la figure d'épaisses étoffes, et les chameaux tournent le dos à la tourmente. C'est le même vent qui soulève les sables du Sahara comme les flots de la mer.

En Italie, il règne parfois un vent tellement chaud qu'il fait périr les animaux qui y restent exposés. Quand il souffle, les habitants restent chez eux, les portes et les fenêtres soigneusement calfeutrées. Les uns regardent ce vent, qu'on nomme *sirocco*, comme la continuation du vent d'Afrique; d'autres admettent qu'il prend naissance sur les rochers arides de la Sicile.

245. **Vitesse des vents.** — La vitesse des vents est très-variable. On la mesure soit en observant l'espace parcouru sur le sol par l'ombre qu'y portent les nuages, soit à l'aide d'appareils connus sous le nom d'*anémomètres* (mesure du vent). Ils consistent en petites roues à ailettes que le vent fait tourner, et la vitesse de celui-ci se déduit de celle qu'il imprime à ces roues.

Le vent léger que les poëtes désignent sous le nom de *zéphyr*, agite à peine le feuillage des arbres, et sa vitesse est au plus d'un demi-mètre par seconde. Un vent dont la vitesse est de 2 mètres est modéré; il est *frais* à 10 mètres; *fort* à 20. Lorsque la vitesse atteint 25 à 30 mètres, il y a *tempête;* et *ouragan*, si elle s'élève de 35 à 45 mètres. Dans nos climats, la vitesse moyenne du vent est de 5 à 6 mètres par seconde.

CHAPITRE X.

SOURCES DE CHALEUR ET DE FROID.

246. **Chaleur solaire.** — Les différentes sources de chaleur sont la radiation solaire, l'électricité, les combinaisons chimiques, la percussion, la pression et le frottement.

De toutes ces sources la plus intense est sans contredit le soleil. On ignore la cause de la chaleur émise par cet astre, que les uns ont regardé comme une masse embrasée, les autres comme un immense foyer d'électricité qui serait en même temps la source de la chaleur et de la lumière solaires.

On a calculé que la quantité de chaleur que la terre reçoit du soleil, chaque année, serait suffisante pour fondre une couche de glace qui envelopperait tout notre globe sous une épaisseur de 30 mètres; et cependant celui-ci, vu sa petite dimension et sa grande distance du soleil, ne reçoit de cet astre qu'une portion infiniment petite de la chaleur qu'il projette tout autour de lui dans les espaces célestes.

Nous ne traiterons point ici de la chaleur dégagée par l'électricité, cette question devant se reproduire plus tard.

247. **Combinaisons chimiques et combustion.** — En chimie, on dit qu'il y a *combinaison* toutes les fois que deux corps s'unissent entre eux en vertu de leur affinité réciproque. Par exemple, la rouille qui se forme sur le fer n'est autre chose qu'une combinaison de ce métal avec l'oxygène de l'air pour former ce qu'on appelle un *oxyde de fer*. Or, les combinaisons chimiques sont accompa-

gnées, en général, d'un dégagement de chaleur plus ou moins intense. Celle-ci n'est point appréciable lorsque les combinaisons se font lentement, comme dans la formation de la rouille citée ci-dessus; mais dans les combinaisons qui s'opèrent vivement, il y a production de chaleur intense, et même de lumière.

On désigne sous le nom de *combustion* toute combinaison qui se fait ainsi avec dégagement de chaleur et de lumière. Les combustions que nous présentent nos foyers, nos lampes, ne sont autre chose que des combinaisons du carbone et de l'hydrogène du bois ou de l'huile avec l'oxygène de l'air. De ces combinaisons naissent de la vapeur d'eau, des gaz, et d'autres produits volatils qui se dégagent sous forme de fumée. On se fait une idée fausse de la combustion en disant que *le feu détruit tout*. Le feu ne détruit rien : il met en liberté certains éléments pour les unir à d'autres; il décompose, mais il est en même temps une cause de production. Par exemple, en brûlant de l'hydrogène on fait de l'eau, en brûlant du carbone on fait de l'acide carbonique. En un mot, un corps qui brûle se transforme mais ne s'anéantit pas.

Quant à la *flamme* qui se produit pendant les combustions, elle est simplement un mélange de matières gazeuses portées à une très-haute température par l'effet même d'une combinaison chimique.

La *fermentation*, qui a pour cause une décomposition de matières organiques, donne aussi naissance à un dégagement de chaleur. C'est pour cette raison que des foins rentrés humides dans les granges peuvent s'échauffer jusqu'à prendre feu. C'est par la même cause que les raisins foulés dans une cuve s'échauffent fortement.

248. **Chaleur dégagée par la pression et par la percussion.** — Toutes les fois que l'on comprime un corps de manière à réduire son volume, il se produit un dégagement de chaleur d'autant plus considérable que la réduction de volume est plus grande. Dans les corps solides, qui sont peu compressibles, le dégagement de chaleur est peu sensible; mais il l'est beaucoup dans les gaz à cause de leur grande compressibilité.

La grande quantité de chaleur qui se manifeste dans les gaz comprimés se démontre au moyen d'un petit appareil connu sous le nom

de *briquet à air*, et qui a déjà été décrit en parlant de la compressibilité des gaz (fig. 4, p. 13). C'est un tube de verre à parois épaisses, bouché à sa partie inférieure, et dans lequel entre un piston en cuir qui le ferme hermétiquement. En dessous du piston est une cavité dans laquelle on place un morceau d'amadou. Or, en enfonçant le piston brusquement, il descend presque jusqu'au bas du tube, et l'air comprimé s'échauffe tellement que l'amadou s'enflamme, ce qui exige une température d'au moins 300 degrés.

La percussion est encore une source de chaleur, comme on peut le remarquer dans les étincelles qui jaillissent du briquet à pierre, ou des fers d'un cheval par le choc d'un caillou. En effet, ces étincelles sont dues à des parcelles de fer qui, détachées par le choc, s'enflamment au contact de l'air par suite de la haute température que leur a communiquée la percussion. Le feu ne sort pas de la pierre, comme on le croit vulgairement; il n'est que le résultat de la combinaison de particules métalliques avec l'oxygène de l'air pour donner naissance à de l'oxyde de fer.

249. **Chaleur dégagée par le frottement.** — Le frottement prolongé de deux corps l'un contre l'autre développe une quantité de chaleur qui varie avec la nature des corps, mais qui est d'autant plus grande que la pression est plus considérable et le mouvement plus rapide. C'est ainsi que souvent les boîtes des roues de voiture s'échauffent au point de prendre feu par leur frottement contre l'essieu. Dans une atmosphère, même au-dessous de zéro, on fond en partie deux morceaux de glace en les frottant l'un contre l'autre avec rapidité. Les sauvages, pour se procurer du feu, tournent vivement entre les deux mains une baguette de bois dur dans une cavité pratiquée sur un morceau de bois tendre; ce dernier s'échauffe alors par le frottement jusqu'à s'enflammer.

La chaleur développée par le frottement, la percussion ou la pression s'explique par un mouvement vibratoire imprimé aux molécules des corps.

SOURCES DE FROID.

250. **Froid produit par la dilatation des gaz.** — Les principales sources de froid sont : 1° la fusion, dont on a vu un effet dans les

mélanges réfrigérants (213); 2° la vaporisation qui, comme on le sait déjà (226), produit un froid assez intense pour congeler l'eau et même le mercure; 3° la dilatation des gaz; 4° le rayonnement en général, et surtout le rayonnement nocturne, c'est-à-dire celui qui se produit pendant la nuit vers les espaces célestes. Ayant déjà fait connaître les deux premières sources de froid, nous n'avons à nous occuper que des deux dernières.

Dans l'expérience du briquet à air (248), on a vu la température de l'air s'élever fortement par la compression; ce phénomène est dû à une certaine quantité de chaleur qui existait à l'état latent dans le gaz, et qui passe à l'état de chaleur sensible à mesure que le volume se réduit. Or, un effet inverse se produit lorsqu'un gaz se dilate par la diminution de pression; la fluidité augmentant, une portion de la chaleur contenue dans le gaz passe de l'état sensible à l'état latent, et il en résulte un abaissement de température qui peut devenir très-considérable.

Pour le démontrer, on comprime de l'air à 3 ou 4 atmosphères dans le récipient de la machine de compression (fig. 91), puis ouvrant le robinet adapté au plateau supérieur, l'air jaillit aussitôt en donnant naissance à un léger brouillard; or, celui-ci a pour cause la vapeur d'eau de l'atmosphère qui se condense par le refroidissement de l'air dilaté; de plus, si l'on place dans le jet la boule d'un thermomètre, non-seulement celui-ci accuse un fort abaissement de température, mais lorsque l'air est humide, la boule se recouvre de glace. Le brouillard qui apparaît dans le jet est une reproduction fidèle de la formation des nuages, et cette glace se déposant sur la boule, nous donne une idée exacte de la formation de la neige.

251. **Froid produit par le rayonnement nocturne.** — Tout rayonnement de calorique par un corps est une cause de refroidissement, puisqu'il y a perte de chaleur. Le jour, cette perte tend à être compensée par la chaleur que les corps reçoivent du soleil; mais, la nuit, cette compensation n'a plus lieu, et c'est pour cela que le refroidissement est bien plus considérable. Avant midi, la terre recevant plus de chaleur qu'elle n'en émet, la température du sol et celle de l'air s'élèvent. Cet effet se continue encore quelque temps après midi, et c'est vers 2 heures qu'a lieu la plus haute

température de la journée. Ensuite, à cause de l'obliquité des rayons, elle diminue à mesure que le soleil est plus pres de l'horizon. Or, après son coucher, en rayonnant vers les espaces célestes la chaleur absorbée pendant le jour, la terre et tous les corps placés à sa surface se refroidissent de plus en plus jusqu'à 3 heures du matin en été, et jusqu'à 6 en hiver, heures auxquelles a lieu dans ces deux saisons la plus basse température des nuits.

Ainsi qu'on l'a déjà vu en parlant de la rosée, les corps se refroidissent d'autant plus par le rayonnement nocturne, qu'ils ont un plus grand pouvoir émissif, qu'ils sont plus élevés et plus éloignés de tout autre corps qui puisse rayonner vers eux, et enfin, que le ciel est plus pur. Lorsqu'il est couvert de nuages, ceux-ci agissent comme réflecteurs pour renvoyer vers les corps terrestres la chaleur qu'ils en reçoivent, et, par suite, le refroidissement est bien moins considérable. On observe, en effet, que l'hiver, le thermomètre marquant pendant plusieurs jours 5 ou 6 degrés au-dessous de zéro, les rivières ne prennent pas quand le ciel est nuageux; tandis que, dans des hivers moins rigoureux, les rivières gèlent lorsque le ciel est serein.

Les habitants de la campagne sont dans l'habitude de dire qu'il gèle plus fort quand la lune paraît que lorsqu'elle est cachée par des nuages. Ils ont raison, mais s'il gèle plus fort, ce n'est pas, comme ils le croient, par l'influence de la lune, c'est à cause de l'absence des nuages.

Les plantes, vu leur grand pouvoir émissif, tendent à se refroidir beaucoup et même à geler par l'effet du rayonnement nocturne. C'est pour cette raison qu'on les recouvre quelquefois de nattes qui font l'office d'écran et s'opposent à la déperdition du calorique.

Enfin, ajoutons que c'est surtout au rayonnement nocturne qu'on doit attribuer les gelées tardives d'avril et de mai, et non à la *lune rousse*, suivant l'opinion générale.

LIVRE VI

DE LA LUMIÈRE.

CHAPITRE PREMIER

PROPAGATION ET VITESSE DE LA LUMIÈRE.

252. **Lumière, hypothèses sur sa nature.** — La *lumière* est l'agent physique qui, en agissant sur l'organe de la vue, nous donne la perception des objets extérieurs. Elle n'est pas seulement ainsi un lien invisible qui nous met en rapport avec tout ce qui nous environne, elle est encore pour nous la source de jouissances infinies, en anéantissant, pour ainsi dire, les distances, en agrandissant la sphère que nous habitons, et en livrant à notre contemplation le spectacle si riche et si varié que nous offre la nature.

La partie de la physique qui traite de la lumière a reçu le nom d'*optique,* d'un mot grec qui signifie *voir*. On peut dire de la chaleur qu'elle est la partie la plus utile de la physique, mais de l'optique, qu'elle est la plus belle et la plus attrayante.

Pour expliquer les phénomènes de l'optique, les physiciens ont adopté les mêmes hypothèses que pour la chaleur (172) : celle *de l'émission* et celle *des ondulations.* Dans la première, la lumière a pour cause l'émission en tous sens, par les corps lumineux, d'un nombre infini de molécules éminemment subtiles, qui se meuvent avec une rapidité extrême et qui, en pénétrant dans l'organe de la vue, y produisent le phénomène de la vision.

Dans la seconde théorie, connue sous le nom de *théorie des ondulations,* les corps lumineux ne projettent plus aucune matière, mais leurs molécules sont animées d'un mouvement vibratoire excessivement rapide, lequel se transmet à un fluide élastique, extrêmement rare et subtil, qu'on nomme *éther*. Ce fluide est

répandu dans tout l'univers et pénètre tous les corps, remplissant les intervalles qui séparent leurs molécules; en sorte qu'il suffit qu'une source de lumière, comme le soleil ou un corps incandescent, mette l'éther en vibration en un quelconque de ses points, pour qu'aussitôt ce mouvement se transmette de proche en proche, en tous sens et avec une vitesse extrême, sous la forme d'ondes sphériques, à peu pres comme le son se propage dans l'air par les ondes sonores. Ce sont ces ondes lumineuses qui, en pénétrant dans l'œil, produisent la sensation de la *clarté;* c'est-à-dire que l'œil perçoit la lumière par les mouvements vibratoires de l'éther, de même que l'oreille perçoit le son par les ondulations de l'air. D'où l'on arrive à cette conséquence que les ténèbres, en optique, correspondent au silence, en acoustique.

L'analogie ne s'arrête pas là : de même que c'est la fréquence des ondes qui fait les sons plus ou moins aigus et détermine les notes, ainsi, dans le système des ondulations de l'éther, c'est la fréquence du mouvement vibratoire de ce fluide qui donne naissance aux différentes couleurs. Nous reviendrons sur ces phénomènes en traitant des couleurs, et nous verrons que le violet correspond, comme les sons aigus, au plus grand nombre de vibrations, et le rouge, de même que les sons graves, au plus petit. Toutefois, disons dès à présent que les vibrations de l'éther, qui produisent la lumière, sont infiniment plus nombreuses et plus rapides que celles qui, dans l'air, donnent naissance au son.

La théorie des ondulations fut d'abord proposée, vers 1660, par Huygens, physicien hollandais, et celle de l'émission, par Newton, en 1669. Appuyé sur le grand nom de ce dernier physicien et sur les brillantes découvertes qu'il avait faites en optique, la théorie de l'émission éclipsa longtemps celle des ondulations, et ce n'est que de 1819 à 1823 qu'un jeune physicien français, Fresnel, prouva victorieusement la supériorité de la théorie des ondulations, en faisant voir qu'elle donne, avec autant de précision que de simplicité, l'explication des phénomènes les plus compliqués de l'optique. Aussi, depuis Fresnel, cette théorie est-elle la seule généralement admise.

253. **Sources de lumière, phosphorescence.** — Tout corps qui fait naître en nous la sensation de la clarté est une source de

lumière, et se désigne sous le nom de ***corps lumineux***. Les diverses sources de lumières sont le soleil, les étoiles, la chaleur, les combinaisons chimiques, la phosphorescence et l'électricité.

On ignore l'origine de la lumière émise par le soleil et les étoiles. On sait seulement que tous les corps soumis à une température élevée deviennent lumineux, et répandent un éclat d'autant plus vif qu'ils sont plus fortement chauffés, comme si la chaleur et la lumière n'étaient qu'une modification d'une même cause. Par exemple, c'est à cause de leur haute température que les charbons de nos foyers deviennent incandescents, et que les barres de fer sortant d'un feu de forge projettent une vive lumière.

Quant aux lumières artificielles, comme celles des bougies, des lampes, des becs de gaz, elles sont toutes dues à la ***combustion*** de substances carbonées et hydrogénées, c'est-à-dire à leur combinaison avec l'oxygène de l'air, combinaison s'opérant avec un dégagement de chaleur si considérable, que les matières qui brûlent deviennent lumineuses (247).

On donne le nom de ***phosphorescence*** à une lumière pâle que répandent certaines substances dans l'obscurité, sans qu'il paraisse y avoir dégagement de chaleur même la plus faible. La phosphorescence s'observe dans les animaux, dans les végétaux et dans les minéraux. Pendant les chaleurs de l'été, le lampyre ou ver luisant brille comme une petite étoile au milieu des champs. Dans les régions tropicales, on voit de nombreux insectes phosphorescents voltiger dans l'air comme autant de petits lustres vivants. Dans les mêmes contrées, la mer est souvent couverte de petits animalcules qui deviennent phosphorescents pendant la nuit, surtout quand l'eau est agitée. Parfois, les bois pourris, les chairs de certains poissons en putréfaction sont aussi phosphorescents. Enfin, par le frottement ou par une exposition prolongée aux rayons solaires, certains minéraux deviennent lumineux dans l'obscurité; tels sont le diamant, le marbre blanc, le spath fluor. La cause de la phosphorescence n'est pas connue; mais, dans plusieurs cas, elle paraît avoir une origine électrique.

Plus tard nous verrons que l'électricité est une source de lumière tellement intense que son éclat peut s'élever à un cinquième ou à un quart de celui du soleil.

254. Corps opaques, transparents, translucides; absorption de la lumière. — Les corps éclaires par une source de lumière présentent deux effets distincts : les uns, comme les bois, les métaux, la plupart des pierres, arrêtent complétement la lumière ; d'autres, au contraire, comme l'air, l'eau, le verre, sont perméables à la lumière, c'est-à-dire la laissent passer entre leurs molécules. La première classe de corps comprend les *corps opaques*, et la deuxième les *corps transparents*, *diaphanes* ou *translucides*. Toutefois, la *diaphanéité* ou *translucidité* s'applique à tous les corps perméables à la lumière, tandis que la *transparence* ne doit s'entendre qu'en parlant des substances au travers desquelles on distingue nettement les objets. Ainsi, on dira également du verre poli qu'il est transparent ou diaphane; mais le verre depoli, le papier huilé, la porcelaine mince, ne sont que diaphanes ou translucides, parce que, quoiqu'ils laissent passer la lumière, on ne distingue pas les objets au travers.

Parmi toutes les substances perméables à la lumière, il n'en est aucune d'une transparence parfaite : toutes éteignent, *absorbent* une portion de la lumière qui se présente pour les traverser. L'expérience montre, en effet, que même les milieux les plus diaphanes, comme l'air, l'eau, le verre, éteignent graduellement la lumière qui les pénètre; et si leur épaisseur est considérable, ils peuvent l'affaiblir assez pour qu'elle ne fasse plus aucune impression sur l'organe de la vue. Par exemple, on remarque que sur le sommet des hautes montagnes, le nombre des étoiles visibles à l'œil nu est beaucoup plus grand que dans la plaine, phénomène qui résulte de ce que la lumière a à traverser une masse d'air moindre dans le premier cas que dans le second. De même, le soleil nous paraît d'un moins vif éclat à l'horizon, parce que ses rayons traversent des couches d'air plus étendues et plus denses.

S'il n'est pas de substances parfaitement diaphanes, il n'en est pas non plus d'entièrement opaques, du moins sous une faible épaisseur. L'or, par exemple, qui est un des métaux les plus denses, se laisse sensiblement traverser par la lumière lorsqu'il est réduit en feuilles très-minces, comme celles que préparent les batteurs d'or. Il en est de même de l'argent : M. Foucault fabrique, pour télescopes, des miroirs de verre argenté, qui, quoique réflé-

chissant parfaitement la lumière, sont recouverts d'une couche d'argent tellement mince qu'on distingue très-nettement les objets au travers; seulement, ils apparaissent avec une légère teinte bleue; au travers de l'or la teinte est verte.

255. **Propagation de la lumière en ligne droite, rayons et faisceaux lumineux.** — En parlant de la propagation de la lumière, on appelle *milieu* la substance même au sein de laquelle elle est transmise : ainsi, l'eau, l'air, le verre, sont des milieux dans lesquels la lumière se propage. Or, la nature du milieu pouvant modifier la marche de la lumière, nous supposerons d'abord un milieu parfaitement *homogène*, c'est-à-dire non-seulement composé dans toutes ses parties des mêmes éléments, mais ayant partout la même densité, conditions qui pourraient exister l'une sans l'autre; l'atmosphère, par exemple, a bien partout la même composition, mais elle n'a pas la même densité, à cause des variations de température et de pressions auxquelles elle est soumise dans ses différentes parties.

Cela posé, l'expérience montre que *dans tout milieu homogène la lumière se propage constamment en ligne droite*. En effet, nous cessons de voir un objet quelconque aussitôt qu'entre cet objet et l'œil est interposé un corps opaque; de même, nous ne pouvons recevoir aucune lumière à travers les petits trous percés dans des plaques opaques, placées les unes à la suite des autres, si ces petits trous ne sont exactement en ligne droite. Observons encore que la lumière émane des corps lumineux dans toutes les directions, car nous les voyons également dans toutes les positions où nous nous plaçons autour d'eux.

Cette émanation de lumière en tous sens autour d'un corps lumineux se désigne, de même que pour la chaleur, sous le nom de *rayonnement*, et on appelle *rayon lumineux* la ligne droite que suit la lumière en se propageant. Dans l'hypothèse de l'émission, un rayon de lumière serait formé d'une file de molécules lumineuses se succédant sans cesse avec une rapidité extrême; dans celle des ondulations, c'est une file de molécules ne se renouvelant pas, mais animées, d'une manière continue, de petits mouvements vibratoires excessivement rapides.

Enfin, on nomme *faisceau lumineux* un ensemble de rayons

émis d'une même source de lumière; si les rayons sont parallèles entre eux, ce qui arrive quand le corps lumineux est très-éloigné, comme le soleil, on dit que le faisceau est ***parallèle;*** il est ***divergent***, lorsque les rayons lumineux se propagent en s'écartant les uns des autres, ce qui est le cas des rayons émis tout autour d'une bougie; au contraire, si les rayons vont concourir vers un même point, on dit que le faisceau est ***convergent :*** on en verra bientôt des exemples dans l'étude des miroirs et des lentilles.

256. **Vitesse de la lumière.** — Rien, à la surface de la terre, ne peut nous donner une idée de l'excessive vitesse avec laquelle se propage la lumière. On n'a pu, en effet, constater aucun intervalle



Fig. 155. — Mesure de la vitesse de la lumière.

appréciable entre l'instant où une lumière artificielle apparaît dans un lieu, et celui où elle est aperçue dans un autre lieu, quelle qu'en soit la distance : aussi, n'est-ce que par l'observation des phénomènes astronomiques qu'on est parvenu à déterminer la vitesse de propagation de la lumière.

C'est Rœmer, astronome danois, qui, le premier, en 1675, a trouvé que cette vitesse, par seconde, est de 77000 lieues de 4000 mètres, découverte qu'il fit en observant les éclipses d'un des satellites de Jupiter. On sait que cette planète a quatre satellites ou lunes qui l'accompagnent autour du soleil, de même que la lune suit la terre dans son orbite. Or, le premier de ces satellites, c'est-à-dire le plus rapproché de Jupiter, fait uniformément, autour de cette planète, une révolution complète en 42 heures, 28 minutes et 36 secondes; mais, comme à chaque révolution, ce satellite *e* entre dans l'ombre portée par Jupiter (fig. 155), il se

trouve périodiquement éclipsé à des intervalles de temps égaux.

Cela posé, tant que la terre occupe la portion de son orbite la plus voisine de Jupiter, comme dans la figure ci-dessus, les éclipses se reproduisent régulièrement toutes les 42 heures, 28 minutes et 36 secondes; mais à mesure que la terre, en tournant autour du soleil, s'éloigne de la planète, on observe un retard d'une éclipse à la suivante; et lorsqu'au bout de six mois la terre a passé de la position T à la position t, il s'est produit un retard de 16 minutes et 36 secondes. Or, en passant de la position T à la position t, la terre s'est éloignée de Jupiter de deux fois la distance du soleil à notre globe, et comme cette distance est de 38 millions de lieues, on en conclut que c'est pour franchir l'intervalle Tt, de 76 millions de lieues, qu'il a fallu un excès de temps de 16 minutes et 36 secondes, ou 996 secondes; résultat qui correspond à la prodigieuse vitesse de 77000 lieues par seconde.

Pour rendre appréciable, s'il est possible, une aussi énorme vitesse, remarquons que pour parcourir cet espace de la terre au soleil, franchi par la lumière en 8 minutes et 18 secondes, un boulet de canon exigerait plus de 17 années; et qu'avec la vitesse de locomotion des chemins de fer, 50 kilomètres à l'heure, il faudrait trois siècles et demi.

Malgré l'immense vitesse de la lumière, les étoiles qui scintillent au firmament sont séparées de notre globe par des intervalles si considérables, que, pour les plus rapprochées, les rayons lumineux qu'elles nous envoient mettent plus de trois ans à se propager jusqu'à nous. Quant aux étoiles qui ne sont visibles qu'à l'aide du télescope, on démontre en astronomie qu'il en est de si éloignées qu'il faut des milliers d'années pour que leur lumière nous parvienne. Qu'on juge alors quelle est l'immensité des cieux, et combien notre globe est petit en comparaison de cet infini!

257. Intensité de la lumière, loi de son décroissement; photomètre. — L'*intensité* d'une source lumineuse, c'est-à-dire l'énergie de son éclat, se mesure par la quantité de lumière qu'elle transmet sur une surface déterminée, par exemple, sur un écran d'un mètre carré de superficie. Or, vu la divergence des rayons lumineux émanés d'une même source, cette quantité de lumière, cette intensité

décroissent rapidement à mesure que le corps éclairé s'éloigne du corps lumineux. En effet, on démontre par des considérations géométriques que l'***intensité de la lumière est en raison inverse du carré de la distance;*** c'est-à-dire qu'à une distance double le corps éclairé reçoit quatre fois moins de lumière; à une distance triple, neuf fois moins, et ainsi de suite.

On vérifie cette loi à l'aide d'un appareil connu sous le nom de ***photomètre***, de deux mots grecs qui signifient ***mesure de la***



Fig. 156. — Photomètre de Rumford.

lumière. Il se compose d'un écran de verre dépoli A, fixé verticalement sur une petite planchette de bois (fig. 156). Devant cet écran est une tige opaque B, au delà de laquelle sont les lumières qu'on veut comparer, de manière que les ombres portées par la tige viennent se former sur l'écran. Or, on remarque que les ombres sont exactement de même teinte quand les deux lumières ont le même éclat; mais si l'une d'elles est plus intense que l'autre, l'ombre qui lui correspond présente une teinte plus foncée; et, dans ce cas, pour donner aux deux ombres la même teinte, il faut reculer progressivement la lumière la plus éclatante.

Ces détails connus, voici comment on constate par l'expérience que l'intensité de la lumière est en raison inverse du carré de la distance. Dans un appartement complétement obscur, on place une bougie devant le photomètre, à une distance arbitraire, à un mètre, par exemple; puis, à une distance double, on fixe quatre bougies identiques à la première et disposées sur une même ligne droite, dans la direction de la tige opaque, comme on le voit dans la figure. Or, on observe alors que les deux ombres portées sur l'écran présentent exactement la même teinte, ce qui prouve que quatre bougies, à deux mètres de distance, n'éclairent pas plus qu'une seule à un mètre: d'où l'on conclut que chacune d'elles, pour une distance double, éclaire quatre fois moins. On vérifie de même que neuf bougies, à trois mètres, éclairent rigoureusement comme une seule à un mètre: la loi énoncée ci-dessus est donc démontrée.

Il importe d'observer que c'est par la divergence des rayons lumineux que l'intensité de la lumière décroît à mesure que sa distance augmente. Pour des rayons parallèles, ce décroissement d'intensité n'aurait plus lieu; l'éclat serait le même à toutes les distances, sauf la perte de lumière qui résulte toujours de l'absorption par les milieux même les plus diaphanes (254).

CHAPITRE II

RÉFLEXION DE LA LUMIÈRE, MIROIRS.

258. **Lois de la réflexion de la lumière.** — Lorsqu'un faisceau lumineux rencontre une surface polie qui l'arrête, la lumière n'est point anéantie par cet obstacle; mais renvoyée par la surface, à la manière d'un corps élastique, elle change de direction, et c'est ce phénomène qu'on désigne sous le nom de *réflexion de la lumière*.

De même que dans la réflexion des rayons calorifiques (190), on nomme *rayon incident* tout rayon lumineux qui tombe sur une surface réfléchissante; *rayon réfléchi*, celui qui est renvoyé par la surface; *normale*, la perpendiculaire menée à cette même

surface au point où s'opère la réflexion; enfin, les angles d'incidence et de réflexion sont ceux que font respectivement avec la normale les rayons incident et réfléchi.

Cela posé, la réflexion de la lumière est toujours soumise aux deux lois suivantes qui sont les mêmes que pour la chaleur :

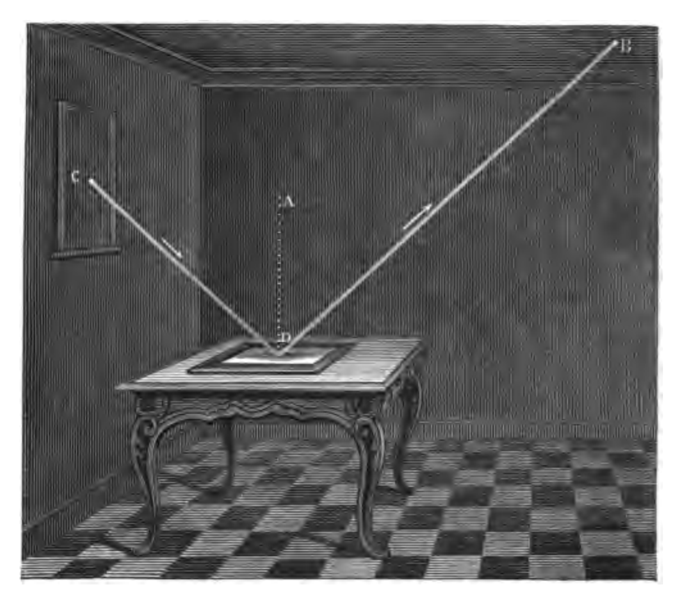


Fig. 157. — Lois de la réflexion de la lumière.

1° *Les angles d'incidence et de réflexion sont égaux;*

2° ***La réflexion n'a lieu que dans une seule direction, telle que le rayon incident et le rayon réfléchi sont dans un plan perpendiculaire à la surface réfléchissante.***

Pour constater les lois de la réflexion, on dispose l'expérience comme le représente la figure 157. Dans une ***chambre obscure***, c'est-à-dire exactement fermée de toute part à la lumière du jour, on laisse pénétrer un faisceau de lumière solaire par une petite ouverture pratiquée dans un volet. Ce faisceau se réfléchit au point D sur un miroir de verre horizontal, et va former au plafond

une image de l'ouverture C. Or, si avec un instrument propre à mesurer les angles, on compare l'angle d'incidence CDA avec celui de réflexion ADB, on trouve qu'ils sont rigoureusement égaux; ce qui prouve la première loi énoncée ci-dessus.

On vérifie la seconde en constatant que les deux rayons CD, DB et la normale AD sont dans un même plan vertical.

Dans le dessin ci-dessus, on a représenté par des flèches le sens dans lequel la lumière se propage; il en sera de même dans toutes les constructions d'optique qui nous restent à faire connaître.

259. **La réflexion de la lumière n'est jamais complète.** — La lumière incidente sur un corps poli n'est jamais complétement réfléchie : toujours une certaine portion en est éteinte, absorbée par la surface réfléchissante. Par exemple, si l'on représente par 100 la quantité de lumière incidente, la portion réfléchie le sera par 80, 90, 95, suivant la nature et le degré de poli du corps réfléchissant, mais jamais elle ne s'élèvera jusqu'à 100.

Les meilleurs réflecteurs sont les métaux polis, surtout quand ils sont blancs, comme le mercure, l'argent. Les corps noirs ne réfléchissent pas la lumière. Les corps translucides en renvoient une petite quantité, en absorbent plus ou moins suivant leur épaisseur, et laissent passer le reste; c'est ce qui arrive pour l'air, l'eau, le verre et tous les milieux transparents.

Pour une même substance, la quantité de lumière réfléchie augmente non-seulement avec le degré de poli, mais encore avec l'obliquité des rayons incidents. Par exemple, si l'on regarde très-obliquement une feuille de papier blanc, placée devant une bougie, la quantité de lumière réfléchie est alors assez considérable pour donner une image pâle de la flamme, effet qui ne se produit pas avec des rayons moins obliques.

260. **Réflexion irrégulière, lumière diffuse.** — La réflexion qui s'opère à la surface des corps polis, suivant les deux lois énoncées précédemment (258), se désigne sous le nom de ***réflexion régulière***, et aussi sous le nom de ***réflexion spéculaire***, d'un mot latin qui veut dire ***miroir***, parce que ce n'est que sur les corps présentant une surface parfaitement lisse et polie, que la lumière se réfléchit régulièrement. Sur les corps à surface rugueuse, la réflexion est ***irrégulière***, c'est-à-dire qu'elle n'est plus soumise aux deux

lois connues. En effet, si dans l'expérience représentée dans la figure 157, on reçoit le faisceau CD, non plus sur un miroir, mais sur un corps mat et dépoli, non-seulement celui-ci est visible dans la direction DB qui correspond à la réflexion régulière, mais on l'aperçoit encore de tous les points où l'on se place dans la chambre obscure, et à toutes les hauteurs; d'où l'on conclut qu'il y a de la lumière réfléchie dans toutes les directions et sous toutes les obliquités, ce qui est contraire aux lois de la réflexion.

Ce phénomène que présente la réflexion de la lumière sur les corps rugueux, est connu sous le nom de ***diffusion***, et on l'explique par la structure même de ces corps, qui présentent une infinité de petites aspérités dont les facettes, plus ou moins inclinées, les unes dans un sens, les autres dans un autre, réfléchissent la lumière dans toutes les directions.

La lumière diffuse joue un rôle important dans le phénomène de la vision. En effet, tandis que les corps lumineux sont visibles par eux-mêmes, les corps opaques ne le sont que par la lumière diffuse qu'ils renvoient en tous sens. Ainsi, lorsque nous contemplons un meuble, un tableau, une fleur, c'est la lumière diffuse réfléchie de tous côtés par ces objets qui nous les fait voir dans quelque direction que nous nous placions par rapport à la lumière qui les éclaire. Si les corps opaques ne réfléchissaient la lumière que régulièrement, ce ne sont pas eux que nous verrions, mais, faisant l'office de miroirs, ils ne nous donneraient que l'image des corps lumineux dont ils nous renverraient la lumière; s'ils ne réfléchissaient pas du tout, ils nous paraîtraient tous également noirs et se confondraient les uns avec les autres. Par exemple, deux corps, l'un blanc et l'autre noir, placés dans les ténèbres sont également invisibles, parce que celui qui est blanc ne recevant pas de lumière ne peut pas en réfléchir. Enfin, c'est la lumière diffuse réfléchie par l'air, par les nues, par le sol, qui éclaire nos appartements et tous les corps qui ne sont pas directement exposés aux rayons solaires; et plus un corps nous envoie de lumière diffuse, plus nous le distinguons nettement. Par exemple, de l'intérieur de nos maisons, nous voyons bien les objets extérieurs, parce que ceux-ci sont fortement éclairés; mais de dehors nous n'apercevons que confusément, dans l'intérieur d'un appartement,

les objets qui s'y trouvent, parce que ceux-ci reçoivent peu de lumière.

261. Direction suivant laquelle nous voyons les corps. — Toutes les fois qu'un faisceau lumineux arrive en ligne droite d'un corps à notre œil, nous voyons ce corps exactement où il est; mais si, par un effet de réflexion, ou par une autre cause, le faisceau lumineux est dévié dans sa route, s'il cesse de nous arriver en ligne droite, nous ne voyons plus le corps dans le lieu où il est, mais *dans la direction qu'a le faisceau lumineux au moment où il pénètre dans l'œil*. Par exemple, si le faisceau AB (fig. 158) est

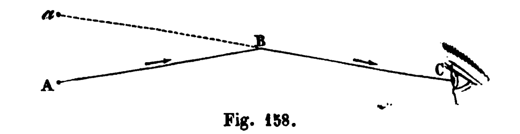


Fig. 158.

dévié en B, pour prendre la direction BC, l'œil ne verra pas le point A en A, mais en *a* sur le prolongement de CB.

Ce principe est général et, quoique fort simple, il mérite de fixer l'attention du lecteur, car c'est sur lui que se fondent les nombreux effets de vision que vont nous présenter les miroirs et les lentilles.

DES MIROIRS.

262. Miroirs plans. — On nomme *miroir* tout corps dont la surface parfaitement polie réfléchit régulièrement la lumière en reproduisant l'image des objets qu'on lui présente. On en distingue de deux sortes : les *miroirs plans* et les *miroirs courbes*.

On a un exemple de miroir plan dans les glaces qui ornent nos appartements. Dans ces miroirs, qui sont en verre, ce n'est pas cette substance qui réfléchit la lumière en assez grande quantité pour donner des images nettes et bien définies, c'est une couche métallique qui est appliquée sur la face postérieure du verre. Cette couche, qu'on nomme *tain*, est un *amalgame* d'étain, c'est-à-dire un alliage de ce métal avec le mercure. La glace de verre n'agit là que pour donner au métal le poli nécessaire et le préserver des agents extérieurs qui tendent à le ternir.

On construit aussi des miroirs métalliques, d'or, d'argent, d'acier, d'étain. Tous ont le grave inconvénient de se ternir au contact de l'air; cependant, les miroirs d'argent étaient en grand usage chez les Romains. On ne peut remonter à l'origine des miroirs. Le premier fut sans doute la surface d'une eau limpide. Ceux de métal paraissent remonter à la plus haute antiquité, car il est fait mention, dans l'*Exode*, d'une cuvette d'étain faite par Moïse avec les miroirs que les femmes israélites lui offrirent.

263. **Formation des images dans les miroirs plans.** — On nomme



Fig. 159. — Faisceau lumineux réfléchi sur un miroir plan.

miroirs plans ceux dont la surface est plane; telles sont les glaces qui décorent les cheminées de nos appartements. Pour comprendre la formation des images dans ces miroirs, considérons d'abord le cas où l'on place devant un semblable miroir un objet de très-petite dimension, par exemple la flamme d'une bougie (fig. 159). Un faisceau lumineux divergent émis par cette flamme et tombant

sur le miroir, s'y réfléchit, comme le montre le dessin. Or, il découle des lois de la réflexion que chaque rayon de ce faisceau conserve, par rapport au miroir, après la réflexion, respectivement la même obliquité qu'il avait avant; d'où il résulte que les rayons réfléchis ont entre eux exactement la même divergence que les rayons incidents. Par conséquent, si l'on conçoit que le faisceau réfléchi soit prolongé derrière le miroir, tous les rayons qui le composent iront rigoureusement y concourir en un même point. Or,



Fig. 160. — Formation des images dans les miroirs plans.

comme nous voyons toujours les objets dans la direction que suivent les rayons lumineux à l'instant où ils nous parviennent (261), il s'ensuit que l'œil qui reçoit le faisceau réfléchi doit voir la flamme de la bougie au lieu même où vont concourir les prolongements des rayons. C'est en effet là que se produit l'image de cette flamme, comme on le voit dans la figure.

Si actuellement, au lieu de supposer un objet très-petit placé devant un miroir, on considère un corps de dimensions quelconques, il suffira, pour interpréter la formation de son image, d'appliquer à chacune de ses parties ce qui vient d'être dit d'un simple point lumineux. Par exemple, dans la figure 160, qui représente une jeune fille se contemplant dans une glace, on voit le rayon parti de son pied gauche se réfléchir sur le miroir et revenir vers l'œil pour lui montrer le pied droit de l'image. De même, le rayon parti de la main droite, après s'être réfléchi, vient donner à l'œil l'image de la main gauche, et ainsi de suite pour tous les points de la figure et du vêtement.

264. Caractères des images formées dans les miroirs plans. — On vient de voir qu'étant placés devant une glace, notre pied gauche correspond au pied droit de l'image, notre main droite à la main gauche de la même image, et ainsi de suite. Or, ce serait exprimer faussement cette transposition des parties de l'image par rapport à l'objet, que de dire que l'image est retournée; si celle-ci n'était autre chose que l'objet retourné, en élevant par exemple notre main droite, l'image devrait aussi lever la main droite, tandis que c'est la gauche qu'elle lève.

Pour exprimer cette égalité spéciale, qui existe entre un objet et son image, on dit que celle-ci est *symétrique* de l'objet; ce qui signifie qu'un point quelconque de l'image est identiquement disposé derrière le miroir de la même manière que l'est en avant le point correspondant de l'objet. En effet, on reconnaît, par des considérations géométriques, que ces deux points sont également distants du miroir, et situés sur une même droite perpendiculaire à sa surface. De la distance et de la position respective des différentes parties de l'objet et de son image, on conclut encore que cette dernière est de même grandeur que lui et également éloignée du miroir.

Enfin, les images des miroirs plans sont *virtuelles*, expression qui signifie qu'elles n'existent pas réellement, qu'elles ne sont qu'une illusion de l'œil. En effet, dans la figure 160, de même que dans la figure 159, la lumière ne passant pas derrière le miroir, elle ne peut y former aucune image, et celle que nous voyons n'existe pas; c'est ce qu'exprime le mot *virtuel* opposé à *actuel*, à *réel*.

En résumant ce qui précède, on voit donc que les images fournies par les miroirs plans ***sont symétriques de l'objet, de même grandeur que lui, à égale distance de l'autre côté du miroir, et enfin qu'elles sont virtuelles.***

265. **Images multiples dans les miroirs de verre.** — Les miroirs métalliques n'ayant qu'une surface réfléchissante, ne donnent jamais qu'une image unique; or, il n'en est plus ainsi des miroirs de verre dont les deux surfaces réfléchissent, mais inégalement. En effet, appliquez un objet quelconque, une pointe de crayon, par exemple, contre une glace épaisse, et regardez obliquement cette pointe; vous verrez d'abord une image très-faible en contact même avec elle; puis, au delà, une autre beaucoup plus intense. La première image est due à la lumière qui se réfléchit sur la surface antérieure de la glace, c'est-à-dire sur le verre, tandis que la seconde est donnée par la lumière qui, pénétrant dans le verre, se réfléchit sur la couche de tain dont est recouverte la face postérieure. Quant à la différence d'intensité des deux images, elle est facile à expliquer : le verre étant très-diaphane, il ne se réfléchit sur la première face du miroir qu'une faible quantité de lumière qui donne l'image la moins intense; au contraire, la plus grande partie de la lumière incidente pénétrant dans la masse se réfléchit sur la couche de tain et donne l'image la plus éclatante.

L'expérience ci-dessus donne un moyen simple de mesurer l'épaisseur d'une glace. En effet, l'image la plus intense devant paraître derrière la couche de tain à la même distance qu'est la pointe du crayon en avant, il s'ensuit que l'intervalle entre la pointe du crayon et la pointe de son image représente le double de l'épaisseur du miroir. Si donc celle-ci paraît être de six millimètres, par exemple, on en conclura que l'épaisseur réelle du verre est de trois millimètres.

La double réflexion des miroirs de verre nuit à la netteté des images, ce qui fait que dans les instruments d'optique où l'on fait usage de miroirs, on emploie de préférence les miroirs de métal.

266. **Réflexion par les corps translucides.** — On vient de voir que le verre, malgré sa grande diaphanéité, réfléchit encore assez de lumière pour donner des images, faibles il est vrai, mais cependant nettes et distinctes. Il en est de même de l'eau et des autres

liquides transparents. Par exemple, sur les bords d'un étang, d'une rivière, on voit se former dans l'eau l'image renversée des objets situés sur la rive opposée. Nous disons images *renversées* pour nous conformer à l'apparence, mais, rigoureusement, nous devrions



Fig. 161. — Réflexion à la surface de l'eau.

dire image symétrique, d'après la remarque faite précédemment (264).

La figure 161 représente le phénomène de la réflexion à la surface de l'eau; elle montre comment les rayons réfléchis, arrivant à l'œil de bas en haut, reproduisent l'image des objets situés au-dessus de l'eau, de la même manière qu'ils le feraient en se réfléchissant sur un miroir horizontal.

MIROIRS COURBES.

267. **Miroirs concaves.** — Il existe plusieurs espèces de miroirs courbes; les plus en usage sont les *miroirs sphériques*, c'est-à-dire dont la courbure est celle d'une sphère. Ils peuvent être en métal ou en verre, et sont *concaves* ou *convexes;* un verre de montre bombé, vu en dessus, donne l'idée d'un miroir convexe,

surtout s'il est recouvert d'une couche de tain sur la face intérieure ; le même verre, étamé sur sa face extérieure et vu en dedans, devient un miroir concave.

Nous allons d'abord faire connaître ce dernier miroir et, pour en faciliter l'étude, nous en considérerons ce qu'on appelle une *coupe* ou une *section*, c'est-à-dire la figure qu'on obtient en le coupant en deux parties égales. Soit donc MN la coupe d'un miroir sphérique concave (fig. 162), et C le centre de la sphère à laquelle

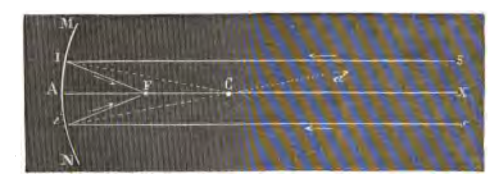


Fig. 162. — Coupe d'un miroir concave.

il appartient. Ce point, par rapport au miroir, prend le nom de *centre de courbure ;* le point A, qui en est le point milieu, est dit son *centre de figure;* enfin, la droite ACX, passant par le centre de courbure et par le centre de figure, est l'*axe principal* du miroir. Toute droite *iCd*, qui passe par le centre de courbure sans passer par le centre de figure, est un *axe secondaire*. Il n'y a qu'un seul axe principal, mais le nombre des axes secondaires est illimité.

Ces définitions connues, ajoutons que pour interpréter plus facilement les effets de la réflexion sur les miroirs courbes en général, on admet l'hypothèse qu'ils sont formés d'une multitude de facettes planes infiniment petites, toutes également inclinées entre elles, de manière à former, par leur ensemble, une surface sphérique régulière. Par suite de cette hypothèse, basée sur l'extrême ténuité des rayons lumineux, lorsque, sur un point quelconque d'un miroir courbe, tombe un rayon de lumière, c'est en réalité sur un petit miroir plan que se produit la réflexion; donc celle-ci est encore soumise aux deux lois données plus haut pour la réflexion sur les surfaces planes (258).

268. Foyers des miroirs concaves. — Les petites facettes dont on

vient d'admettre que sont formés les miroirs concaves, étant toutes inclinées vers un centre commun, qui est le centre de courbure du miroir, il résulte, de cette obliquité même, que les rayons réfléchis par ces miroirs tendent toujours à aller se réunir en un point unique qu'on désigne sous le nom de *foyer*, comme on l'a déjà vu dans la chaleur (191).

Pour nous rendre compte de cette propriété des miroirs con-

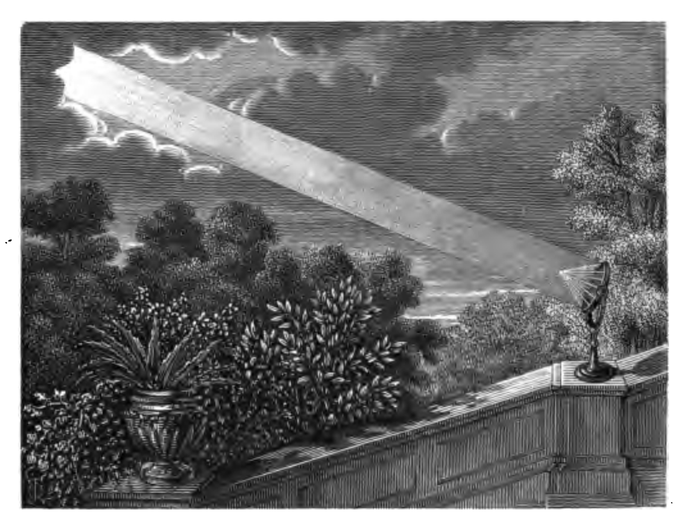


Fig. 163. — Foyer principal.

caves, soit un rayon SI tombant sur un semblable miroir parallèlement à l'axe AX (fig. 162). D'après l'hypothèse admise dans le paragraphe précédent, la réflexion se produit en I sur un miroir plan infiniment petit; quant à la normale correspondant à ce petit miroir, on démontre par la géométrie qu'elle est toujours représentée par la droite CI qui joint le centre au point I. Par suite, l'angle SIC représente l'angle d'incidence; et si l'on conçoit, de l'autre côté de la normale, une droite IF qui fasse avec CI un angle FIC égal à CIS, cette droite sera la direction du rayon réfléchi.

Or, lorsque les rayons incidents sont parallèles à l'axe du miroir,

comme dans l'exemple ci-dessus, on prouve, par des considérations géométriques, que le point F, où le rayon lumineux vient rencontrer l'axe, est le milieu de AC, c'est-à-dire qu'il est à égale distance du centre et du miroir. Cette propriété étant commune à tous les rayons parallèles à l'axe, il en résulte qu'après s'être réfléchis, ces rayons viennent tous concourir en un même foyer F, comme le montre le dessin.

Le foyer qu'on vient de considérer, celui qui se forme à égale distance du centre et du miroir, est désigné sous le nom de *foyer principal;* il se produit toutes les fois que les rayons qui tombent sur le miroir sont parallèles à son axe; on en voit un exemple dans la figure 163, qui représente un faisceau de lumière solaire tombant sur un miroir concave. Si l'on place, au point de concours des rayons réfléchis, un petit écran de verre dépoli, il y apparaît un point lumineux très-éclatant; c'est le foyer principal. On va voir qu'il en existe en outre deux autres : le foyer conjugué et le foyer virtuel. Pour distinguer le foyer principal des deux autres, nous le désignerons dans tous nos dessins par la lettre F.

269. **Foyer conjugué.** — Dans les exemples qui précèdent, nous avons considéré des faisceaux de rayons parallèles, ce qui suppose l'objet lumineux placé à l'infini, ou du moins à une très-grande distance. Soit actuellement le cas où la source de lumière étant à une petite distance, les rayons qui tombent sur le miroir sont divergents, comme le montre la figure 164. Ici les rayons réfléchis sont bien encore convergents, mais ils le sont moins que dans les figures 162 et 163, ce qui résulte de la divergence que possède la lumière en arrivant sur le miroir. Par suite, le point où vont concourir les rayons réfléchis en est plus éloigné; au lieu d'être en F, à égale distance du miroir et du centre, il est en *b* entre les points F et C. Ce point *b*, où viennent se réunir les rayons réfléchis, est encore un foyer; pour le distinguer du foyer principal F, on le désigne sous le nom de *foyer conjugué*, d'un mot latin qui veut dire *lié*, parce qu'il existe entre la position du point lumineux B et celle du foyer *b*, cette liaison que lorsque l'objet lumineux est en B, les rayons viennent former leur foyer en *b;* et que réciproquement si le point lumineux est transporté au point *b*, les rayons réfléchis vont former leur foyer en B.

On a vu qu'il n'y a qu'une position unique pour le foyer principal, laquelle est à égale distance du centre et du miroir; il n'en est plus ainsi du foyer conjugué, dont la position est au contraire très-variable. En effet, supposons que, dans la figure ci-dessous, la bougie soit éloignée du miroir, la divergence des rayons que celui-ci reçoit diminuant à mesure qu'on recule la bougie, les rayons réfléchis convergent de plus en plus, et le foyer *b* se rapproche du point F, avec lequel il finira par coïncider quand la

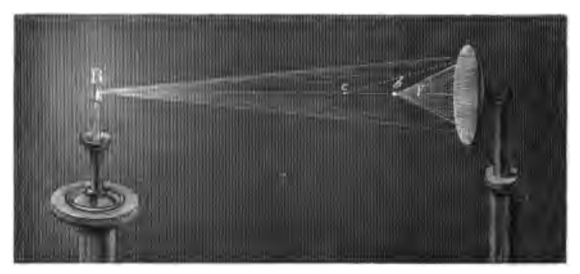


Fig. 164. — Foyer conjugué.

bougie sera suffisamment éloignée pour que les rayons incidents soient sensiblement parallèles.

Au contraire, si la bougie se rapproche du miroir, les rayons qui tombent sur celui-ci formant un faisceau de plus en plus divergent, il en sera de même de la lumière réfléchie; par suite, les rayons renvoyés par le miroir allant concourir de plus en plus loin, le foyer *b* avancera vers le centre C; et si la bougie s'approche du même point jusqu'à coïncider avec lui, il en sera de même du foyer *b*, en sorte que la bougie et son image se confondront en C.

Enfin, si la bougie, se rapprochant toujours du miroir, passe entre le centre et le foyer principal F, le foyer conjugué *b* continuant à s'éloigner du miroir, passe de l'autre côté du centre, et va se former d'autant plus loin que le corps lumineux est plus près du foyer principal; si la bougie vient coïncider avec ce dernier point, le foyer conjugué va se former à une distance infinie, et les rayons réfléchis deviennent parallèles

Ces différents effets de réflexion sont une conséquence de l'éga-

lité constante entre l'angle de réflexion et l'angle d'incidence. On les vérifie très-simplement en plaçant, dans une chambre obscure, une bougie devant un miroir concave, successivement dans les différentes positions qu'on vient de considérer, puis en cherchant par tâtonnement où va se former le foyer lumineux sur un petit écran de papier blanc qu'on tient à la main, et qu'on éloigne ou qu'on approche peu à peu du miroir.

270. **Foyer virtuel.** — Après avoir fait connaître les différentes positions du point où vont concourir les rayons réfléchis par un

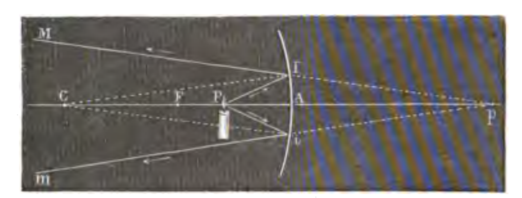


Fig. 165. — Foyer virtuel.

miroir concave, tant que le corps lumineux est au delà du foyer principal, ou en ce point même, il nous reste à chercher ce que deviennent ces mêmes rayons lorsque la source de lumière se trouve en un point P plus rapproché du miroir que le foyer principal (fig. 165). Dans ce cas, les rayons réfléchis forment un faisceau divergent, et dès lors ils ne peuvent donner lieu à aucun foyer en avant du miroir; mais, pour l'œil qui les reçoit, il se produit identiquement le même effet que dans les miroirs plans (263), c'est-à-dire qu'il est affecté par les rayons réfléchis IM et *im*, absolument comme si la bougie était placée derrière le miroir au point *p*, où vont concourir les prolongements de ces rayons. C'est donc en *p* qu'on voit l'image de la bougie; toutefois, la lumière ne pénétrant pas derrière le miroir, cette image n'existe pas en réalité, c'est pourquoi le foyer qui paraît se former en *p* se désigne sous la dénomination de foyer ***virtuel***, expression prise dans le même sens que dans les miroirs plans (264).

271. **Formation des images dans les miroirs concaves.** — Les miroirs concaves donnent lieu à deux sortes d'images, l'une réelle, l'autre virtuelle. Leur formation se déduit facilement de ce qui

vient d'être dit du foyer conjugué et du foyer virtuel. Cependant, nous devons ajouter la remarque suivante : lorsqu'un point lumineux ou éclairé est situé sur l'axe principal d'un miroir, son foyer, réel ou virtuel, se forme toujours sur cet axe, c'est le cas qui s'est présenté dans les figures 164 et 165 ; mais si le point lumi-

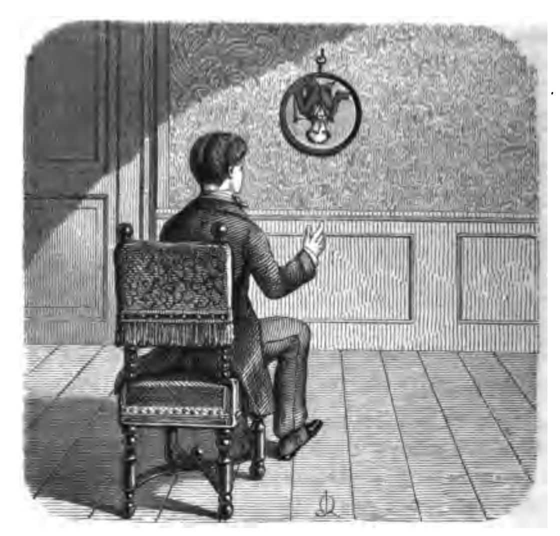


Fig. 166. — Image réelle dans les miroirs concaves.

neux est situé sur un axe secondaire, c'est sur cet axe même que se trouve le foyer. Par exemple, si dans la figure 162, donnée plus haut, une bougie était placée en *d*, sur l'axe secondaire, *i*C*d*, les rayons réfléchis iraient former leur foyer sur la ligne C*i*. Cela posé, cherchons comment se forment les images dans les miroirs concaves.

Image réelle. — Si l'on se place à une certaine distance en avant d'un miroir concave, on ne se voit plus droit et de grandeur naturelle, comme dans les miroirs plans, mais renversé et beaucoup plus petit, ainsi que le montre la figure 166. C'est à cette image qu'on donne le nom d'***image réelle***, pour exprimer qu'elle n'est pas une illusion de l'œil, comme celle qu'on voit dans les mi-

roirs plans, mais qu'elle existe réellement. En effet, on peut la recueillir sur un écran; il suffit, pour cela, de placer le miroir devant un objet fortement éclairé, par exemple devant un édifice sur lequel dardent les rayons solaires; puis se plaçant sur le côté du miroir, on tient à la main un petit écran blanc au point où doit se

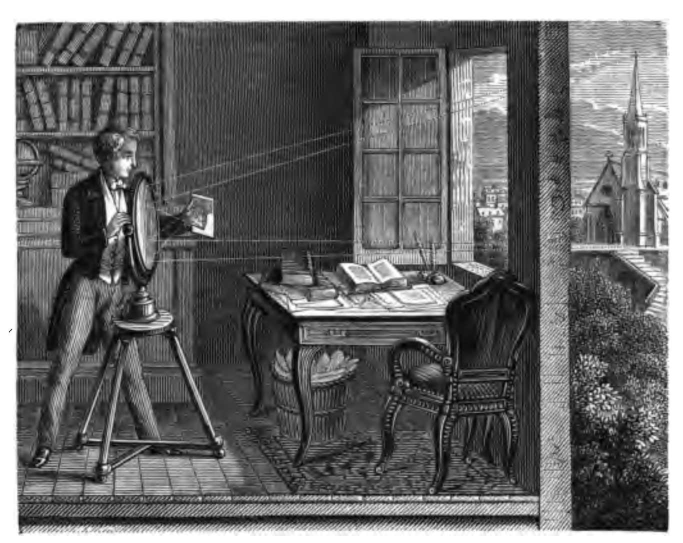


Fig. 167. — Image réelle reçue sur un écran.

former le foyer conjugué. Les faisceaux partis des différents points de l'édifice allant se réfléchir sur le miroir et converger ensuite respectivement sur l'écran, viennent y peindre, en miniature, une image non moins remarquable par le coloris que par la fidélité des contours (fig. 167) : elle n'a d'autre défaut que d'être renversée.

La formation de cette image est facile à expliquer. En effet, d'après ce qui a été dit des foyers conjugués (269), chaque point de l'image est le foyer conjugué du point correspondant du corps éclairé, et se trouve sur le même axe secondaire; or, tous les axes secondaires partis des différents points de ce corps, se croisant au centre de courbure du miroir, il en résulte, comme le montre la

figure, que les rayons renvoyés par les parties les plus élevées du corps vont converger vers la portion inférieure de l'image, et que réciproquement les rayons partis du pied vont se réunir sur les points les plus élevés de cette même image; ce qui explique comment celle-ci est renversée.

Il est à remarquer que l'image réelle, dans les miroirs concaves, n'est pas toujours plus petite que l'objet éclairé, comme cela a lieu dans les deux dessins ci-dessus; elle peut aussi être plus grande. C'est ce qui se produit lorsque l'objet étant placé entre le foyer principal et le centre de courbure, son image va se former au delà de ce dernier, et elle est alors d'autant plus grande qu'elle va se former plus loin.



Fig. 168. — Image virtuelle des miroirs concaves.

Image virtuelle. — La figure 166 ci-dessus fait voir comment, placé à une certaine distance en avant d'un miroir concave, on se voit plus petit et renversé. Or, si l'on approche davantage, il vient un moment où l'on n'aperçoit plus aucune image; c'est lorsqu'on se trouve entre le centre et le foyer principal, parce qu'alors l'image se forme derrière l'observateur. Placé au foyer principal même, il n'y a point encore d'image, car on sait (269) que des rayons lumineux partis de ce foyer, donnent naissance, après s'être réfléchis sur un miroir concave, à un faisceau de lumière parallèle; par suite, les rayons n'allant concourir ni en avant ni en arrière du miroir, ils ne peuvent donner lieu à aucune image. Mais si l'on continue à s'approcher du miroir, tout à coup on voit reparaître son image, qui, de plus petite et renversée qu'elle était, est maintenant redressée et très-amplifiée, comme dans la figure 168 : c'est l'image virtuelle.

Pour se rendre compte de la formation de cette image, il importe de se rappeler ce qui a été dit du foyer virtuel (270) : 1° qu'il ne

se forme qu'autant que l'objet lumineux ou éclairé est placé entre le foyer principal et le miroir; 2° que ce foyer virtuel, ou, ce qui est la même chose, l'image virtuelle d'un point quelconque de l'objet, est, derrière le miroir, sur l'axe secondaire même mené par ce point. Par conséquent, la tête de l'observateur étant placée entre le miroir et le foyer principal (fig. 169), tous les rayons partis d'un point quelconque *a* du visage reviennent à l'œil, après la

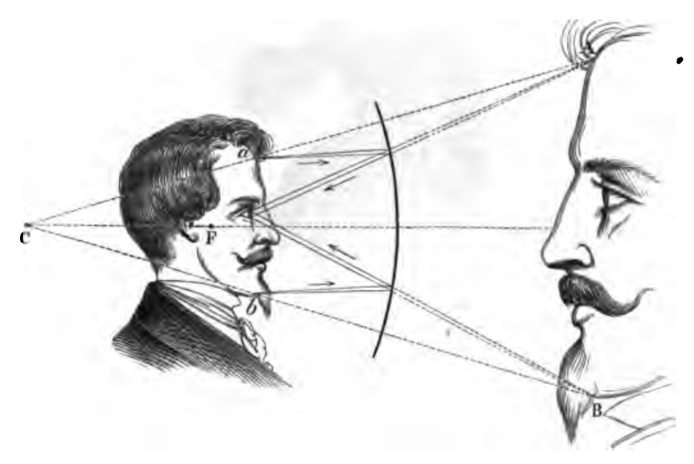


Fig. 169. — Formation de l'image virtuelle dans les miroirs concaves.

réflexion, comme s'ils étaient partis du point A, où vont concourir les prolongements des rayons réfléchis, sur l'axe secondaire C*a*A. De même les rayons envoyés du point *b* reviennent à l'œil comme s'ils étaient émis du point B situé sur le prolongement de l'axe secondaire C*b*. L'œil voit donc en AB une image droite et amplifiée.

272. Formation des images dans les miroirs convexes. — On a déjà vu que les miroirs convexes sont des miroirs sphériques qui réfléchissent la lumière sur leur surface externe, c'est-à-dire sur la partie bombée. Quelle que soit la distance d'un objet lumineux ou éclairé placé devant ces miroirs, on n'obtient jamais qu'une image virtuelle, située de l'autre côté du miroir, toujours redressée et plus

petite que l'objet. C'est ce qu'on vérifie en se regardant dans un miroir de cette espèce, comme le représente la figure 170. Quant à la



Fig. 170. — Image réduite donnée par les miroirs convexes.

formation de cette image, il est facile de s'en rendre compte à l'inspection de la figure 171. Ici elle est plus petite que l'objet parce

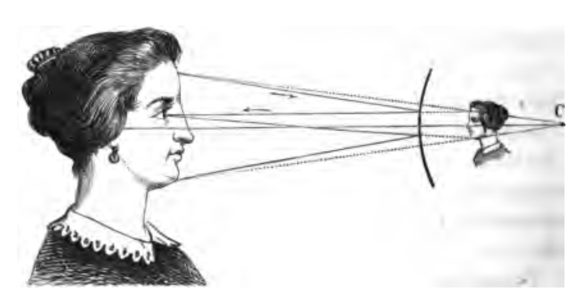


Fig. 171. — Formation des images virtuelles dans les miroirs convexes.

qu'elle est plus rapprochée que lui du point C où vont se rencontrer les axes secondaires, tandis que c'est l'inverse qui a lieu dans la formation de l'image virtuelle des miroirs concaves (fig. 169).

CHAPITRE III

RÉFRACTION DE LA LUMIÈRE.

273. **Phénomène de la réfraction.** — Lorsqu'un rayon lumineux passe plus ou moins obliquement d'un milieu transparent dans un autre, par exemple de l'air dans l'eau, de l'air dans le verre, il éprouve une déviation de la ligne droite qu'il parcourt, comme on le voit dans la figure 172, laquelle représente un rayon de lumière pénétrant de l'air dans l'eau. C'est ce changement de direction qu'on désigne sous le nom de *réfraction*, d'un mot latin qui signifie *brisé*, parce qu'en effet le rayon se brise au point A, où il passe de la direction LA à la direction AK.

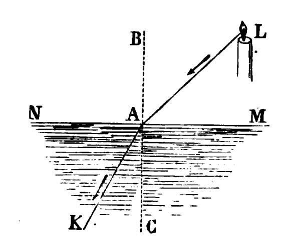
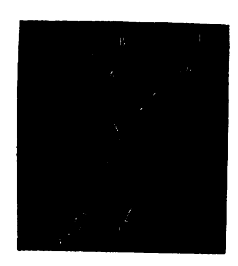


Fig. 172. — Phénomène de la réfraction.

Le rayon LA se nomme encore *rayon incident*; AK est le *rayon réfracté*; la perpendiculaire BC, menée par le point d'incidence A à la surface MN qui sépare les deux milieux, se nomme la *normale*; enfin, l'angle BAL est dit l'*angle d'incidence*, et l'angle CAK l'*angle de réfraction*. Si l'angle d'incidence est nul, c'est-à-dire si le rayon incident se confond avec la normale, il en est de même du rayon réfracté, et dès lors il n'y a pas réfraction, la lumière continuant à se propager en ligne droite[1].



1. *Lois de la réfraction.* — Lorsqu'elle passe d'un milieu transparent dans un autre, la lumière en se réfractant est toujours soumise aux deux lois suivantes :

1° *Pour les mêmes milieux, le rapport entre le sinus de l'angle d'incidence et le sinus de l'angle de réfraction est constant ;*

2° *Le rayon incident et le rayon réfracté sont dans un même plan perpendiculaire à la surface qui sépare les deux milieux.*

Pour comprendre ces lois, reportons-nous à la figure ci-contre, dans laquelle le rayon LA passe

274. Corps réfringents, cause de la réfraction. — Lorsqu'un rayon lumineux se réfracte en passant d'un milieu dans un autre, tantôt il se rapproche de la normale en formant un angle de réfraction plus petit que l'angle d'incidence, comme cela a lieu dans la figure ci-dessus; tantôt, au contraire, il s'en écarte en faisant l'angle de réfraction plus grand que l'angle d'incidence. Dans le premier cas, on dit que le second milieu est plus *réfringent* que le premier, et dans le second cas qu'il l'est moins.

Newton remarqua, le premier, qu'un corps est d'autant plus réfringent qu'il contient davantage d'éléments combustibles. L'eau, dans la composition de laquelle il entre de l'hydrogène, gaz combustible, est très-réfringente; l'alcool, l'éther, les huiles, qui, outre l'hydrogène, contiennent du carbone, sont encore plus réfringents que l'eau. Le diamant, qui est uniquement composé de carbone, est le plus réfringent de tous les corps. C'est à son grand pouvoir réfringent que sont dus les brillants effets de lumière qui le font rechercher comme parure. Les corps les moins réfringents sont les gaz; mais on augmente leur pouvoir réfringent en les comprimant, c'est-à-dire en augmentant leur densité.

Dans la théorie de l'émission (252), on expliquait le phénomène de la réfraction en admettant que les substances dans lesquelles pénètre la lumière exercent, sur les molécules lumineuses, une attraction qui varie avec la densité et la nature des corps. Dans la théorie des ondulations, la réfraction est due à un changement de vitesse que subit la lumière en passant d'un milieu dans un autre.

275. Preuves expérimentales de la réfraction. — On peut constater par de nombreuses expériences la déviation que subissent les rayons lumineux lorsqu'ils pénètrent d'un milieu dans un autre.

de l'air dans l'eau. Si du point d'incidence A, avec un rayon égal à l'unité, on décrit une circonférence, et que des points *m* et *p* où elle coupe les deux rayons incident et réfracté, on abaisse sur la normale BC, les perpendiculaires *mn* et *pq*, la première s'appelle le *sinus* de l'angle d'incidence, et la seconde le *sinus* de l'angle de réfraction.

Or, c'est le rapport de ces perpendiculaires, de ces sinus, qui est constant; c'est-à-dire que *mn* étant par exemple les $\frac{4}{3}$ de *pq*, si l'angle d'incidence diminue ou augmente, il en sera de même de l'angle de réfraction, mais le sinus du premier sera toujours les $\frac{4}{3}$ du sinus du dernier.

Ce rapport constant se nomme *indice de réfraction;* sa valeur varie avec les milieux transparents. C'est le diamant qui a le plus grand indice de réfraction.

Par exemple, si, dans une chambre obscure, on fait tomber un faisceau de lumière solaire sur un vase d'eau à parois transparentes (fig. 173), on distingue très-bien le faisceau qui se brise en pénétrant de l'air dans l'eau, surtout si l'on a répandu dans le



Fig. 173. — Preuve expérimentale de la réfraction.

liquide et dans l'air, une poussière légère qui rende le faisceau plus apparent.

Ou bien encore, mettez une pièce de monnaie au fond d'un vase opaque, et placez-vous de manière que les rayons lumineux réfléchis par cette pièce soient interceptés par les bords du vase. Vous n'apercevez d'abord aucune partie de la pièce, mais si, sans vous déplacer, vous versez peu à peu de l'eau dans le vase, vous voyez d'abord les bords de la pièce, puis une moitié, puis tout entière. Or, que s'est-il passé? Il n'y a rien de changé dans la position de votre œil, ni dans celle de la pièce; ce sont les rayons venant de celle-ci qui ont changé de direction. Ceux qui étaient interceptés

tout à l'heure par les parois du vase le sont encore; mais des rayons qui, avant qu'il y eût de l'eau dans le vase, passaient au-dessus

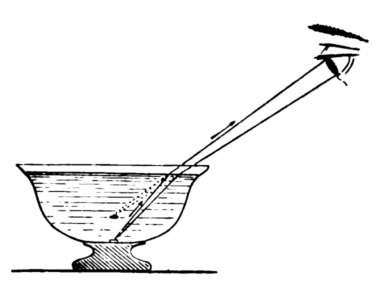


Fig. 174. — Autre preuve de la réfraction.

de votre tête, se sont dirigés vers votre œil en se réfractant à leur passage de l'eau dans l'air, de manière à s'écarter de la perpendiculaire à la surface du liquide, comme le représente la figure 174.



Fig. 175. — Effet de la réfraction.

276. **Effets divers de la réfraction.** — La réfraction de la lumière nous présente des phénomènes variés, qui tous ont pour effet de

tromper l'œil en nous faisant vôir les objets où ils ne sont pas, d'après ce principe déjà cité (261) que l'œil aperçoit toujours les corps dans la direction des rayons lumineux qu'il en reçoit. Par exemple, dans l'expérience ci-dessus, la pièce de monnaie paraît plus haute qu'elle n'est réellement; c'est ainsi que nous ne voyons pas, dans l'eau, les poissons à la place qu'ils occupent, mais un

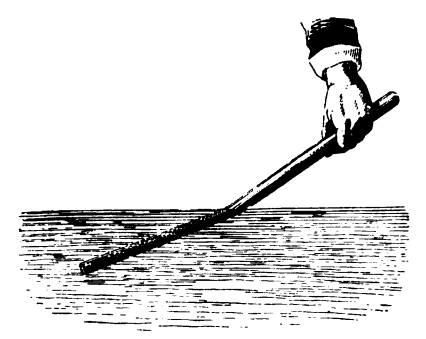


Fig. 176. — Autre effet de la réfraction.

peu au-dessus, ainsi que l'indique la marche du rayon réfracté dans la figure 175. On conçoit que le même phénomène nous montrant le fond d'un ruisseau, d'une rivière, plus haut qu'il n'est en réalité, nous fait juger l'eau moins profonde, illusion qui peut devenir dangereuse.

C'est le même effet de réfraction qui fait paraître rompu un bâton à moitié plongé dans l'eau, lorsqu'on le regarde de côté, car la portion hors de l'eau étant vue à sa véritable place, tandis que celle qui est immergée paraît relevée, il en résulte l'illusion qui nous fait voir le bâton brisé à la surface du liquide (fig. 176).

Enfin, citons encore l'influence que la réfraction exerce sur le lever et le coucher apparents des astres, lesquels sont visibles pour nous un peu avant qu'ils soient au-dessus de l'horizon, et un peu après être descendus au-dessous. Pour expliquer ce phénomène, supposons l'atmosphère partagée en couches parallèles à la surface du globe, comme le représente la figure 177. En vertu de la pression exercée par les couches supérieures sur les couches inférieures,

ces dernières sont plus denses et par suite plus réfringentes, puisqu'on a vu précédemment (174) que le pouvoir réfringent de l'air augmente avec la densité. Les rayons solaires qui pénètrent dans l'atmosphère avancent donc en se réfractant toujours dans le même sens d'une couche à la suivante; d'où il résulte qu'au lieu de se propager en ligne droite, ils se propagent en réalité suivant une

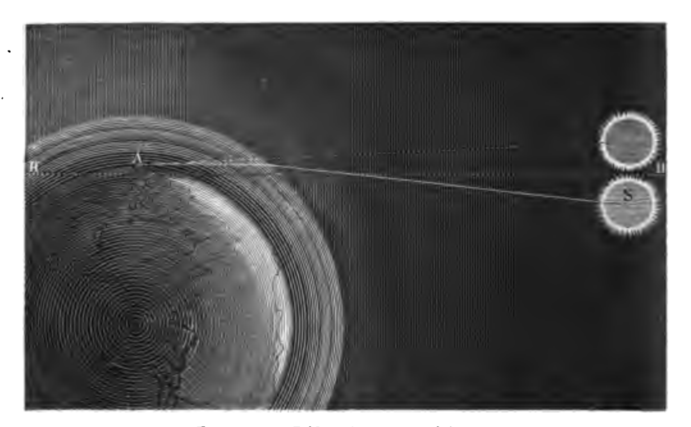


Fig. 177. — Réfraction atmosphérique.

ligne légèrement courbe. Voilà comment il se fait que le soleil étant encore en S, au-dessous de l'horizon HH, un observateur placé en A, à la surface de la terre, le voit au-dessus, relevé, en moyenne, d'une hauteur égale au diamètre apparent de l'astre.

277. **Cas où la réfraction se change en réflexion.** — Toutes les fois que la lumière passe d'un milieu dans un second plus réfringent, de l'air dans l'eau, par exemple, rien ne s'oppose à ce que le rayon réfracté se rapproche de la normale pour former avec elle un angle plus petit que l'angle d'incidence, et, dans ce cas, le phénomène de la réfraction est toujours possible; mais si, au contraire, le second milieu est moins réfringent que le premier, cas où les rayons réfractés s'éloignent de la normale, il y a une limite à leur écartement, et, par suite, la réfraction peut devenir impossible.

Pour interpréter ce phénomène, soit une sphère de verre creuse,

remplie d'eau jusqu'à son centre (fig. 178), et un rayon lumineux LA qui entre dans le liquide sans se réfracter, parce qu'il y pénètre perpendiculairement à la petite facette plane qu'on peut toujours concevoir au point où entre la lumière (283). Ce même rayon se réfracte au point A en passant de l'eau dans l'air, et s'écarte de la normale BAC suivant une direction AR. Or, si l'on conçoit que le corps lumineux s'éloigne graduellement de AC, l'angle d'incidence CAL augmentant, il en sera de même de l'angle de réfraction BAR; il se présentera donc une grandeur de l'angle CAL telle que le rayon réfracté sortira parallèle à la surface AM du liquide. C'est à cet angle d'incidence que correspond la limite de la réfraction. En effet, pour tout angle d'incidence plus grand, l'angle de réfraction devra surpasser l'angle BAM : il faudra donc que la lumière prenne, au-dessous de AM, une direction telle que A*r*. Mais alors il n'y a plus réfraction, puisque la lumière, se propageant toujours dans l'eau, ne change point de milieu. En effet, si le rayon incident est alors représenté par *l*A, en mesurant les deux angles *l*AC et CA*r*, on trouve qu'ils sont rigoureusement égaux, ce qui prouve qu'au point A la lumière s'est réfléchie suivant les lois ordinaires de la réflexion.

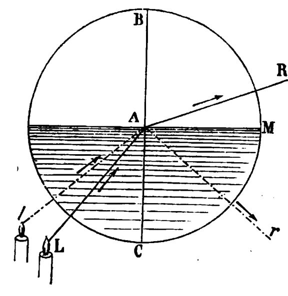


Fig. 178. — Réflexion intérieure.

Cette sorte de réflexion à la surface qui sépare un milieu plus réfringent d'un milieu moins réfringent, se désigne sous le nom de ***réflexion intérieure***; on lui donne aussi le nom de ***réflexion totale***, parce qu'ici toute la lumière incidente est réfléchie, ce qui n'a jamais lieu dans la réflexion ordinaire, même sur les surfaces les mieux polies. C'est par un effet de cette réflexion intérieure que, regardant très-obliquement la surface d'une eau la plus limpide, on ne voit rien de ce qui est au fond, car alors les rayons envoyés par les objets immergés ne sortent pas de l'eau. Cette même réflexion intérieure nous présente un effet remarquable dans le phénomène du mirage.

278. Mirage. — Le *mirage* est une illusion d'optique qui fait apercevoir, au-dessous du sol, une image renversée des objets éloignés. Ce phénomène s'observe surtout dans les pays chauds, et particulièrement dans les plaines sablonneuses de l'Égypte. Là, le sol offre souvent l'aspect d'un lac tranquille sur lequel se réfléchissent les arbres et les objets environnants ; mais c'est en vain que le voyageur redouble de vitesse, ce lac imaginaire et si dé-



Fig. 179. — Mirage.

siré fuit devant lui à mesure qu'il approche. Ce phénomène a été observé dès la plus haute antiquité ; c'est Monge, géomètre et physicien français, qui, le premier, en a donné l'explication, lorsqu'il faisait partie de l'expédition d'Égypte, en 1798.

Le mirage est un phénomène de réfraction qui a pour cause l'inégale densité des couches de l'atmosphère, lorsque les plus inférieures sont dilatées par leur contact avec un sol fortement échauffé ; les couches les moins denses étant alors les plus rapprochées de la terre, un rayon lumineux qui, d'un objet élevé, se dirige vers le sol, traverse des couches d'air de moins en moins denses, et, par suite, de moins en moins réfringentes (274). Le rayon lumineux va donc en s'infléchissant de plus en plus d'une couche à la suivante, jusqu'à ce que l'angle d'incidence, qui va toujours croissant, atteigne la limite où la réfraction se change en réflexion. Le rayon

se relève alors au point *a*, comme le montre la figure 179, pour subir une suite de réfractions en sens contraire des premières, car il passe actuellement dans des couches de plus en plus denses. La lumière arrive donc à l'œil de l'observateur avec la direction qu'elle aurait si elle était partie d'un point situé au-dessous du sol, et c'est pour cela que l'œil voit une image renversée des objets éloignés, comme si les rayons lumineux se réfléchissaient à la surface d'une eau tranquille.

CHAPITRE IV

EFFETS DE LA RÉFRACTION AU TRAVERS DES PRISMES ET DES LENTILLES.

279. **Milieux à faces planes parallèles.** — Lorsqu'un faisceau lumineux traverse un milieu transparent, on peut, quant aux effets produits, considérer trois cas : 1° celui où ce milieu est compris entre deux surfaces planes parallèles; 2° celui où il est compris entre deux surfaces planes inclinées entre elles; 3° enfin, celui où le milieu est compris entre deux surfaces courbes, ou entre une surface courbe et une surface plane, ce qui donne les mêmes effets.

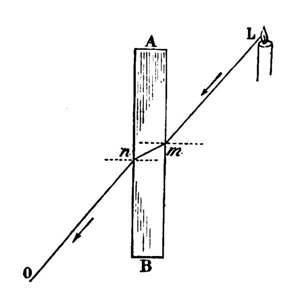


Fig. 180. — Marche des rayons dans un milieu à faces parallèles.

Considérons d'abord le premier cas, et soit un rayon lumineux L*m* traversant une lame de verre AB (fig. 180); à son passage de l'air dans le verre, au point *m*, ce rayon se rapproche de la normale, mais comme à sa sortie du verre, au point *n*, il s'en écarte exactement de la même quantité, il en résulte qu'après avoir traversé la lame de verre, sa direction O*n* est rigoureusement parallèle à L*m*; d'où l'on conclut que la lumière n'est pas déviée lorsqu'elle traverse un milieu à faces parallèles.

280. **Prismes.** — On nomme *prisme*, en physique, toute sub-

stance transparente à faces planes, inclinées entre elles. Par exemple, les facettes d'un bouchon de carafe, prises deux à deux, forment autant de prismes. La figure 181 représente la forme et la disposition qu'on donne ordinairement au prisme pour les expériences d'optique. C'est une masse de verre ou de cristal taillée latéralement en trois facettes planes, et terminée aux extrémités par deux faces triangulaires égales et parallèles. Les trois lignes droites suivant lesquelles se rencontrent, dans le sens de leur longueur, deux faces adjacentes du prisme sont ses *arêtes*. Enfin, la masse de verre ainsi taillée peut tourner autour d'un axe parallèle à ses arêtes; de plus, elle est montée sur un pied à double charnière, de manière à recevoir telle position horizontale, verticale, ou oblique que l'on veut.



Fig. 181. — Prisme.

Les prismes produisent sur la lumière qui les traverse deux effets remarquables : 1° une déviation considérable; 2° une décomposition en diverses espèces de lumières. Quoique ces deux effets soient toujours simultanés, nous considérerons d'abord le premier seul; le second sera étudié plus tard sous le nom de *dispersion*.

281. **Marche des rayons lumineux dans les prismes.** — Pour tracer la marche que suit un rayon lumineux en passant au travers d'un prisme, concevons celui-ci coupé par un plan perpendiculaire à ses arêtes, et soit *mno* (fig. 182) la section ainsi obtenue. Si l'on considère un rayon lumineux se propageant suivant cette section, et rencontrant le prisme en *a*, ce rayon se rapproche de la perpendiculaire à la surface *mn* pour prendre la direction *ab*. Or,

à sa sortie du prisme, il se brise de nouveau dans le même sens en s'écartant de la perpendiculaire à la surface *mo*, puisqu'il passe dans un milieu moins réfringent. Il décrit donc une ligne brisée L*abc* ; en sorte que l'œil qui reçoit le rayon *bc*, qu'on nomme rayon *émergent*, d'un mot latin qui signifie *sortir*, voit l'objet lumineux dans la direction *cbr*, c'est-à-dire relève vers le point *m* ; ce qu'on

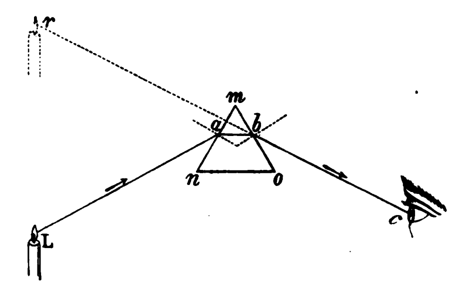


Fig. 182. — Marche des rayons dans le prisme.



Fig. 183. — Déviation produite par le prisme.

exprime en disant qu'un objet vu au travers d'un prisme paraît dévié vers l'arête qui sépare les faces d'incidence et d'émergence.

Pour constater ce phénomène par l'expérience, on regarde, au travers d'un prisme horizontal, un objet quelconque, comme le représente la figure 183, et on le voit très-relevé quand l'arête qui sépare les faces d'incidence et d'émergence est en haut ; si le prisme est tourné en sens contraire, cette même arête en bas, l'objet paraît abaissé. Si le prisme est vertical, l'image est déplacée vers la droite ou vers la gauche de l'observateur, selon la position de l'arête vers l'une ou l'autre direction.

Cette propriété des prismes de briser deux fois la lumière dans le même sens est la base de tout ce que nous allons dire sur les lentilles.

LENTILLES.

282. **Différentes espèces de lentilles.** — On nomme *lentilles*, en optique, des disques de verre compris entre deux surfaces sphériques, ou entre une surface plane et une surface sphérique. La

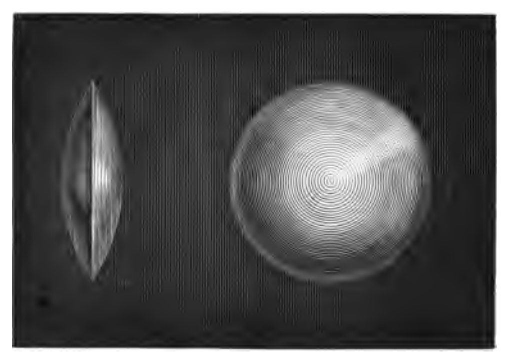


Fig. 184. Fig. 185.

Lentille biconvexe.

vraie lentille, la seule à laquelle ce nom convienne réellement, est celle dont les deux faces sont bombées, telle qu'elle est représentée de profil dans la figure 184, et de face dans la figure 185; mais cette dénomination de *lentille*, qui lui vient de sa ressem-

blance avec la graine de ce nom, a été étendue à d'autres masses de verre, à cause de l'analogie de leurs effets sur la lumière.

On compte en tout six espèces de lentilles, représentées en coupe dans les figures 186 et 187. Les trois lentilles M, N, O, dont les faces se rapprochent du centre vers les bords, sont dites *convergentes*, parce qu'elles jouissent de la propriété de faire converger les rayons qui les traversent. Au contraire, les trois lentilles P, Q, R, dont les faces s'écartent du centre vers les bords, sont *divergentes*.

Ces six lentilles se distinguent en outre par les dénominations suivantes :

La lentille M, dont les deux faces sont convexes, est dite *biconvexe;* tandis que la lentille P, dont les faces sont concaves, est dite *biconcave;*

Les lentilles N et Q sont, l'une, *plan-convexe;* l'autre, *plan-concave;*

Enfin, les lentilles O et R portent l'une et l'autre le nom de *ménisque*, d'un mot grec qui veut dire *croissant;* pour les distinguer entre elles, on appelle la première *ménisque convergent*, et la seconde *ménisque divergent*.

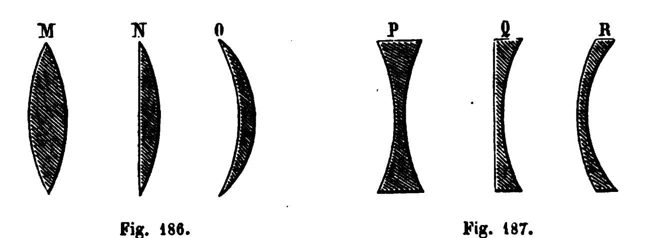


Fig. 186. Fig. 187.

Coupes des différentes sortes de lentilles.

Dans l'étude de ces différentes lentilles, il suffit de considérer la lentille biconvexe M, et la lentille biconcave P; en effet, les propriétés de la première s'appliquent aux trois qui sont convergentes, et celles de la seconde aux trois divergentes.

283. **Axe principal, centre optique, axes secondaires.** — Avant de faire connaître les propriétés des lentilles biconvexes, il est nécessaire de poser quelques définitions analogues à celles déjà don-

nées pour les miroirs. Pour cela, remarquons que toute lentille biconvexe est, comme le montre la figure 188, la portion commune à deux sphères qui se coupent. Cela posé, les centres C et *c* de ces sphères sont dits les ***centres de courbures*** de la lentille, et la droite indefinie XY, qui passe par ces deux points, en est l'***axe principal***.

Outre les deux centres de courbure, il existe encore un point remarquable dans les lentilles, c'est le ***centre optique***. On nomme ainsi un point O situé sur l'axe principal et également distant des

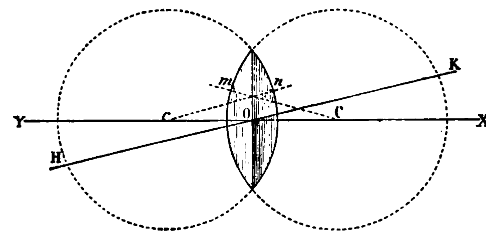


Fig. 188.

deux faces de la lentille, du moins quand elles sont de même courbure, ce qui est le cas ordinaire. Or, on démontre, par la géométrie, que tout rayon lumineux qui, en traversant une lentille, passe par son centre optique, sort sans déviation; c'est-à-dire qu'il se comporte entièrement comme s'il passait dans un milieu à faces parallèles (279), tandis que les rayons lumineux qui traversent une lentille sans passer par ce point, sont brisés deux fois dans le même sens comme à travers les prismes (281).

Toute droite KH, menée par le centre optique, sans passer par les centres de courbure, est un ***axe secondaire***; il n'y a qu'un axe principal, mais le nombre des axes secondaires est illimité. On va voir ci-après l'axe principal et les axes secondaires jouer, pour la construction des images dans les lentilles, identiquement le même rôle que dans les miroirs concaves ou convexes.

Enfin, pour faciliter l'étude des phénomènes que présentent les lentilles, nous continuerons à nous servir de l'hypothèse déjà adoptée pour les miroirs courbes, c'est-à-dire que nous suppo-

serons la surface des lentilles formée d'une infinité de petites surfaces planes inclinées entre elles de manière à former, par leur ensemble, une surface sphérique. Par suite, la normale, ou perpendiculaire à une quelconque de ces petites faces planes, en *m* par exemple, est la droite *m*C, joignant le point *m* au centre de courbure; de même, en *n*, la normale est *cn*. Cette hypothèse admise, les propriétés des lentilles se déduisent facilement de celles des prismes (281).

284. **Marche des rayons dans les lentilles biconvexes, foyers.** — Les rayons lumineux qui arrivent pour traverser une lentille pou-

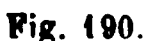


Fig. 189.

vant être parallèles entre eux ou divergents, considérons d'abord le premier cas, et supposons en outre que les rayons soient parallèles à l'axe principal, comme le montre la figure 189. Se fondant sur l'hypothèse que la surface courbe d'une lentille est un assemblage de petites facettes planes inclinées entre elles, on voit que le rayon X, qui se confond avec l'axe principal, traverse la lentille perpendiculairement aux facettes, à l'entrée et à la sortie, et que, par suite, il continue à se propager en ligne droite, comme traversant en réalité un milieu à faces parallèles. Or, il n'en est plus ainsi de tout rayon L plus ou moins distant de l'axe principal, car ici les petites facettes, aux points d'incidence et d'émergence, étant inclinées entre elles comme les faces d'un prisme, le rayon s'infléchit deux fois dans le même sens, de manière à venir rencontrer l'axe principal en un point F. Un autre rayon M est dévié de même, et quoique plus éloigné de l'axe principal, il vient encore le rencontrer en F, ce qui résulte de ce que les deux facettes opposées, à l'entrée et à la sortie, étant d'autant plus inclinées l'une par rapport à l'autre qu'elles sont plus voisines des bords de la

lentille, elles impriment au rayon lumineux une déviation plus considérable.

Tous les rayons parallèles à l'axe se comportant de la même manière après avoir traversé la lentille, on voit comment un faisceau parallèle est transformé par celle-ci en un faisceau convergent. Le point où viennent ainsi concourir les rayons qui étaient parallèles à l'axe est désigné, de même que dans les miroirs, sous le nom de ***foyer principal***, et nous le représenterons encore par la


Fig. 190.

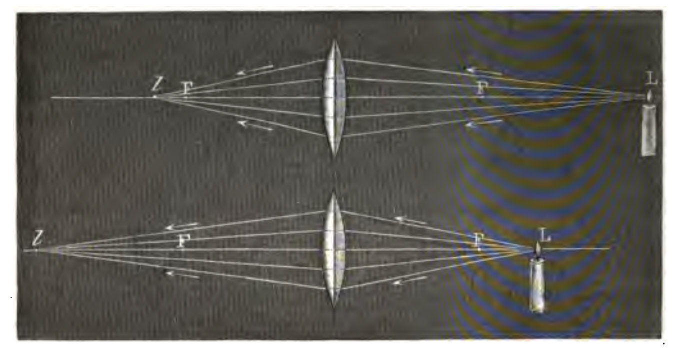


Fig. 191.

lettre F. Un semblable foyer peut se former également de chaque côté de la lentille, selon la direction dans laquelle se propage la lumière.

La position du foyer principal est toujours facile à déterminer : il suffit pour cela de recevoir sur la lentille un faisceau de rayons parallèles, par exemple un faisceau de lumière solaire, puis de recevoir, derrière la lentille, les rayons réfractés sur un petit écran de papier. En avançant ou en reculant celui-ci, on trouve une position où l'image lumineuse qui se forme sur l'écran atteint un maximum d'éclat : c'est en ce point qu'est le foyer principal.

285. **Foyer conjugué.** — Après avoir considéré le cas où les rayons lumineux sont parallèles, ce qui suppose la source de lumière très-éloignée, voyons actuellement celui où cette source est placée à une petite distance, mais toutefois plus loin que le foyer princi-

pal (fig. 190). Le faisceau qui tombe sur la lentille étant alors divergent, il résulte de cette divergence même qu'après avoir traversé la lentille, les rayons convergent moins rapidement que dans la figure 189, et que, par suite, ils ne vont plus concourir en F, mais au delà, en un point l qu'on nomme *foyer conjugué* du point L, pour exprimer, de même que dans les miroirs concaves, la corrélation qui existe entre ces deux points, corrélation telle

Fig. 192.

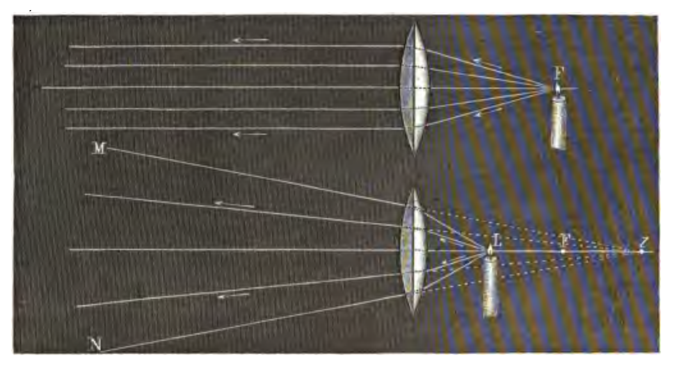


Fig. 193.

que si l'objet lumineux passe de L en l, réciproquement le foyer conjugué passe de l en L.

La position du foyer conjugué n'est pas fixe, elle varie avec celle de l'objet lumineux ; plus celui-ci se rapproche de la lentille, plus le foyer conjugué s'en éloigne, comme le montre la figure 191, car les rayons incidents étant de plus en plus divergents, il en est nécessairement de même des rayons émergents.

Soit actuellement le cas où l'objet lumineux continuant à s'approcher de la lentille, vient à coïncider avec le foyer principal (fig. 192); celui-ci étant le point de concours des rayons parallèles à l'axe, il s'ensuit que réciproquement des rayons lumineux émanés de ce point suivent, en sens contraire, le même chemin qu'en y arrivant; c'est-à-dire qu'ils forment, à leur sortie de la lentille, un faisceau parallèle à l'axe, et que dès lors il ne peut, dans le

cas que nous considérons, se produire de foyer à aucune distance.

286. **Foyer virtuel.** — Il nous reste à considérer un autre foyer, le *foyer virtuel*. Pour cela, supposons que l'objet lumineux, s'approchant toujours de la lentille, passe entre celle-ci et le foyer principal (fig. 193). La divergence du faisceau incident étant ici plus grande que dans la figure 192, il faut que les rayons, après avoir traversé la lentille, s'épanouissent plus qu'ils ne le faisaient dans cette figure; ils doivent donc être divergents, comme le montre le faisceau MN. Or, pour l'œil qui reçoit ces rayons, ils semblent partis du point *l* où vont concourir leurs prolongements. C'est donc en ce point qu'apparaît l'objet lumineux, mais ce n'est là qu'un foyer virtuel, qu'une illusion de l'œil, identiquement comme dans les miroirs concaves lorsque l'objet lumineux est placé entre le miroir et son foyer principal (270).

287. **Résumé des propriétés des lentilles biconvexes.** — En résumant les paragraphes qui précèdent, on en déduit les trois principes suivants sur les propriétés des lentilles biconvexes :

1° Les rayons lumineux parallèles à l'axe vont, après avoir traversé une pareille lentille, concourir en un point unique, qui est le foyer principal (fig. 189); et réciproquement, des rayons partis de ce foyer forment, à leur sortie de la lentille, un faisceau parallèle à l'axe (fig. 192).

2° Les rayons lumineux émis d'un point situé au delà du foyer principal sortent convergents de la lentille, et vont concourir en un point qu'on nomme foyer conjugué (fig. 190), lequel se forme d'autant plus loin derrière la lentille que l'objet lumineux placé en avant est plus rapproché du foyer principal.

3° Enfin, les rayons partis d'un point situé entre la lentille et le foyer principal sortent divergents et donnent naissance à un foyer virtuel situé du même côté que l'objet (fig. 193).

Ces notions sur les foyers sont indispensables pour la théorie des images produites par les lentilles.

FORMATION DES IMAGES DANS LES LENTILLES.

288. **Images réelles dans les lentilles biconvexes.** — La réfraction de la lumière dans les lentilles biconvexes donne naissance à

des images tout à fait comparables à celles qu'on a vues se produire par réflexion dans les miroirs concaves (271), et qui sont, comme dans ceux-ci, de deux sortes, les unes réelles, les autres virtuelles.

Occupons-nous d'abord de l'image réelle. Celle-ci se forme toutes les fois qu'un objet quelconque est placé en avant d'une lentille convergente, au delà de son foyer principal; la lentille reproduit alors, de l'autre côté, une image renversée de l'objet, laquelle

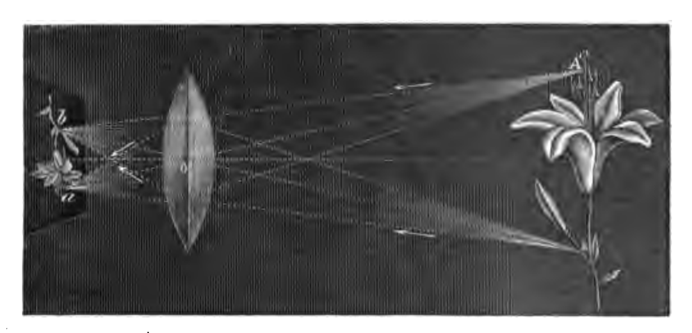


Fig. 194. — Image réelle des lentilles convergentes.

peut être recueillie sur un écran (fig. 194), et n'est pas moins remarquable par la fidélité du coloris que par l'exactitude des contours : c'est l'image réelle.

Sa formation est facile à expliquer en s'appuyant sur ce qui a été dit des foyers conjugués (285); toutefois, il importe d'ajouter que toutes les propriétés de l'axe principal d'une lentille s'appliquant exactement aux axes secondaires, il en résulte qu'ainsi qu'un point placé sur l'axe principal a son foyer sur cet axe, de même tout point situé sur un axe secondaire a toujours son foyer sur ce dernier. Cela posé, dans la figure ci-dessus, tous les rayons partis du point A vont converger en *a*, sur l'axe secondaire mené par le point A, et y former le foyer conjugué de ce point, c'est-à-dire son image. De même l'image du point B va se former en *b*, et le même phénomène ayant lieu pour tous les points de l'objet, il se produit un ensemble de foyers conjugués qui constituent l'image *ab*, renversée et plus petite; le renversement résulte du

croisement des axes secondaires entre l'objet et l'image, et la petitesse de celle-ci de ce qu'elle se forme plus près de la lentille que n'est l'objet.

Toutefois, l'image n'est pas toujours plus petite que l'objet, elle peut être plus grande. En effet, d'après la réciprocité de position qui existe entre l'objet et son foyer conjugué (285), si, dans la

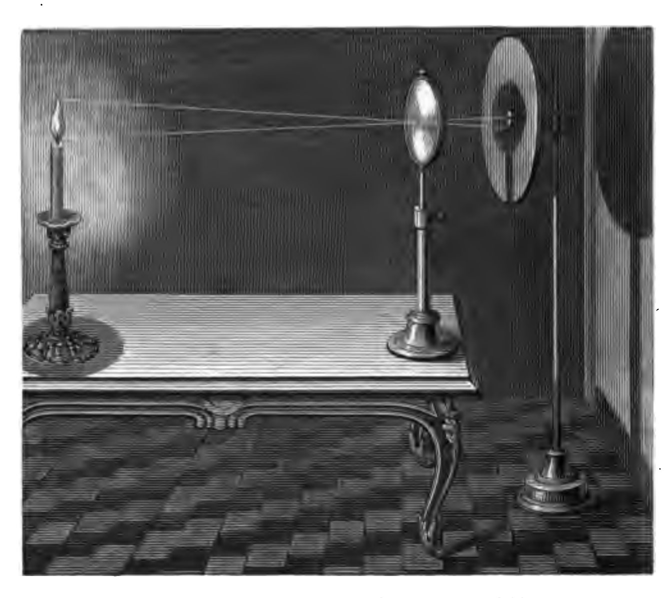


Fig. 195. — Cas où l'image est plus petite que l'objet.

figure ci-dessus, *ab* était l'objet, alors les rayons lumineux suivant le même chemin, mais en sens contraire, l'image irait se former en AB, toujours renversée, mais plus grande. Une lentille biconvexe peut donc donner des images réelles plus grandes ou plus petites que l'objet. Pour le vérifier, on fait l'expérience suivante : dans une chambre obscure, on place une lentille biconvexe, et, en avant de celle-ci, à quelques mètres au delà du foyer principal, une bougie allumée. Posant ensuite, derrière la lentille, un écran qu'on approche plus ou moins, on trouve une position où il

se reproduit sur l'écran une image très-petite et renversée de la bougie, comme le montre la figure 195. Au contraire, si rapprochant la lentille de la bougie on augmente en même temps la distance de l'écran, on obtient une image encore renversée, mais très-amplifiée (fig. 196).

Ce principe que les lentilles biconvexes *donnent des images*

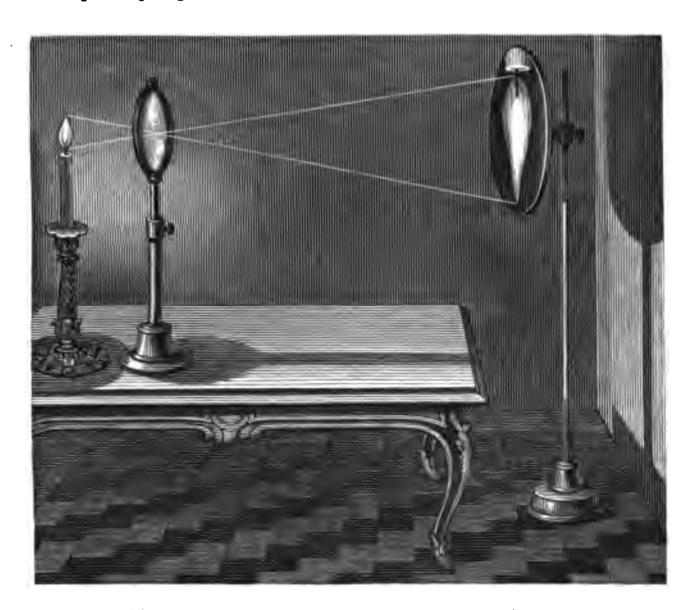


Fig. 196. — Cas où l'image est plus grande que l'objet.

réelles très-petites des objets éloignés, et, au contraire, *des images très-amplifiées des objets rapprochés*, est très-important et présentera de nombreuses applications dans les instruments d'optique qui seront bientôt décrits, tels que le microscope, la longue-vue, la lanterne magique, la fantasmagorie, etc.

289. **Images virtuelles dans les lentilles biconvexes.** — Outre les images réelles que nous venons de considérer, les lentilles biconvexes donnent encore des images virtuelles, qui se produisent dans le même cas que les foyers virtuels (286), c'est-à-dire lorsque

l'objet est situé entre la lentille et le foyer principal. En effet, soit un objet *ab* (fig. 197) placé entre une lentille biconvexe et son foyer principal; en appliquant ici ce qui a été dit précédemment sur les foyers virtuels, on sait que tous les rayons partis d'un point quelconque *a* de l'objet, sortent divergents et arrivent à l'œil comme s'ils étaient partis du point A, où vont concourir les mêmes

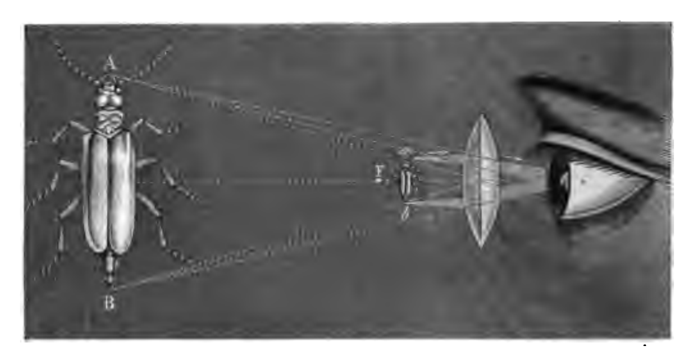


Fig 197. — Image virtuelle des lentilles convergentes.

rayons prolongés, et où se fait, pour l'œil, l'image virtuelle du point *a*. Par la même raison, l'œil voit en B l'image du point *b*; c'est donc en AB qu'apparaît l'image de *ab*, mais elle est virtuelle; c'est-à-dire qu'elle n'existe pas réellement, qu'on ne pourrait la recevoir sur un écran, en un mot, qu'elle n'est qu'une pure illusion.

Il est à remarquer que, contrairement à ce qui a lieu pour celle qui est réelle, l'image virtuelle est droite et toujours plus grande que l'objet : le redressement de l'image provient de ce que les axes secondaires ne se rencontrent plus entre celle-ci et l'objet, mais au delà; quant à son grossissement, il résulte de ce que l'image est plus éloignée que l'objet du point d'intersection des axes secondaires menés par les points *a* et *b*.

Les verres lenticulaires, employés comme verres grossissants, prennent le nom de *loupe*. Tout le monde a observé qu'en regardant de près, avec une loupe, les caractères d'un livre, ils paraissent plus gros; si l'on éloigne progressivement la loupe, il vient un

moment où les caractères disparaissent, c'est lorsqu'ils sont au foyer principal; en l'écartant encore les caractères reparaissent, mais renversés, parce qu'ils sont alors au delà du foyer principal.

290. **Lentilles biconcaves, foyers et images.** — On a vu, dans l'étude des lentilles biconvexes, que l'épaisseur décroissant du centre vers les bords, les petites facettes planes qui correspondent à l'incidence et à la sortie d'un même rayon, vont en s'inclinant de plus

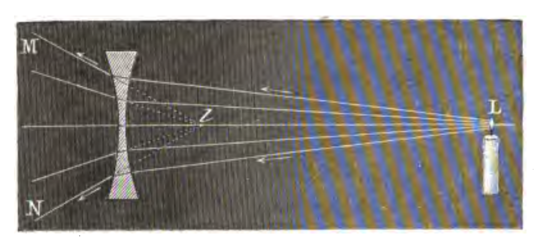


Fig. 198

en plus du centre à la périphérie. Or, dans les lentilles biconcaves, au contraire, où l'épaisseur croît du centre vers les bords, les petites facettes s'écartent de plus en plus; de là nécessairement des phénomènes opposés. En effet, tandis que les lentilles biconvexes font converger les rayons lumineux qui les traversent, en les brisant deux fois dans le même sens pour les rapprocher de l'axe principal, les lentilles biconcaves produisant l'effet inverse, ne font qu'augmenter la divergence des rayons.

Ce phénomène est facile à interpréter à l'inspection de la figure 198, dans laquelle on voit comment les rayons sont déviés deux fois dans le même sens pour s'écarter de l'axe et donner naissance au faisceau divergent MN. Or, l'œil qui reçoit ce faisceau en est impressionné comme si l'objet lumineux était en *l*; il se produit donc en ce point un foyer virtuel, le seul qui soit possible dans les lentilles biconcaves.

Puisque ces sortes de lentilles ne possèdent que des foyers virtuels, il est évident qu'elles ne peuvent donner aussi que des images virtuelles; de plus, ces images sont toujours redressées et plus petites que l'objet. En effet, soit un objet AB vu au travers d'une

lentille biconcave (fig. 199) ; le faisceau lumineux parti du point A est dévié, à son passage dans la lentille, de manière à arriver à l'œil comme s'il était émis du point *a* situé sur l'axe secondaire AO. De même le faisceau émis du point B parvient à l'œil comme s'il était parti du point *b*. Il se forme donc en *ab*, entre les axes secondaires AO et BO, une image virtuelle, plus petite et redressée, de

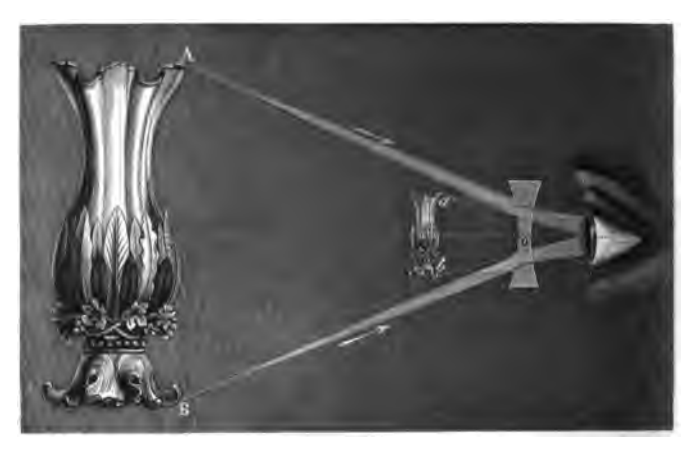


Fig. 199. — Image virtuelle des lentilles divergentes.

l'objet AB. Cette image est nécessairement toujours plus petite que l'objet, puisqu'elle est plus rapprochée du point O où se croisent les axes secondaires.

APPLICATIONS DES LENTILLES.

291. **Réfraction des rayons calorifiques.** — Les rayons calorifiques, qui obéissent aux lois de la réflexion de même que les rayons lumineux (191), sont aussi soumis aux lois de la réfraction. En effet, lorsqu'on reçoit un faisceau de lumière solaire sur une lentille convergente, il n'y a pas, au foyer, concentration de lumière seulement, mais aussi de chaleur, car si l'on place, en ce point, un corps inflammable, tel que de l'amadou, du papier, un morceau d'étoffe, de bois même, ce corps ne tarde pas à entrer en combus-

tion. Si la lentille est à grandes dimensions, on peut même ainsi fondre des métaux.

Cette propriété des lentilles convergentes peut être utilisée pour se procurer du feu, mais elle peut aussi avoir des effets dangereux, en devenant une cause d'incendie, lorsqu'on laisse une lentille exposée aux rayons solaires. Le même accident peut être produit



Fig. 200. — Réfraction des rayons calorifiques.

par des vases de verre pleins d'eau, lorsqu'ils sont sphériques, car ils réfractent la lumière et la chaleur à la manière d'une lentille biconvexe.

La concentration des rayons calorifiques du soleil par les lentilles a reçu une application dans certains cadrans solaires, où l'heure de midi est marquée par la détonation d'un petit canon fixé sur le cadran (fig. 200). Pour cela, au-dessus du canon est une lentille convergente dont le foyer correspond exactement à la *lumière* du canon, à l'instant même où le soleil passe au méridien du lieu. Par suite, le canon étant chargé et amorcé d'avance, la lentille enflamme la poudre juste à midi, et la détonation annonce l'heure au loin.

292. **Phares.** — On nomme *phares* des feux qu'on allume la nuit sur de hautes tours, le long des côtes de la mer, pour guider

les navigateurs dans les ténèbres et leur indiquer les écueils. Les phares étaient connus des anciens, et le plus fameux a été celui que Ptolémée Philadelphe fit élever, l'an 470 de la fondation de Rome, sur la petite île de Pharos, près d'Alexandrie, laquelle a été depuis réunie au continent par les atterrissements du Nil. C'est ensuite du nom de cette île qu'on a appelé *phares* toutes les

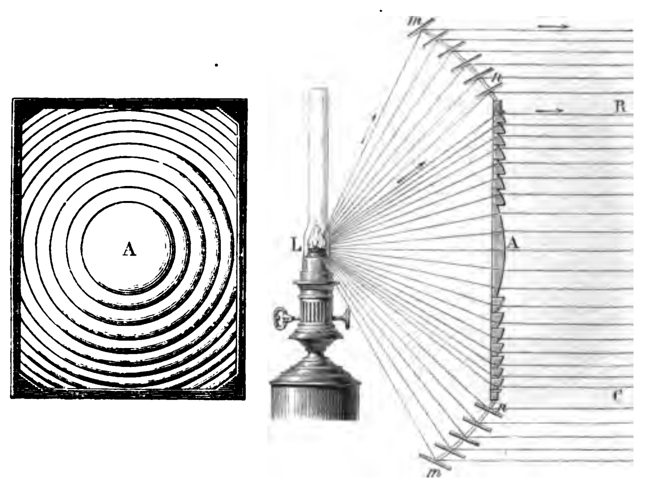


Fig. 201. Fig. 202.

Lentille à échelons.

tours sur lesquelles on allume des feux pour servir de signal aux navigateurs.

Dans l'origine, les phares étaient éclairés avec des feux de bois, de charbon, ou de matières bitumineuses; mais ces feux étaient ternes et vacillants. On les remplaça plus tard par des lampes à huile, placées au foyer principal de réflecteurs concaves qui renvoyaient au loin avec une grande intensité le faisceau réfléchi, celui-ci étant parallèle (257). C'était là déjà un grand progrès; mais ce n'est qu'en 1822 que Fresnel, déjà immortalisé par ses savantes recherches sur la théorie des ondulations de l'éther, donna aux phares toute la perfection qu'ils ont aujourd'hui.

Abandonnant les réflecteurs métalliques qui se ternissent facilement sous l'influence des brouillards salés de la mer, Fresnel leur substitua de grandes lentilles plan-convexes, au foyer desquelles il plaça une forte lampe à quatre mèches concentriques, et équivalente, pour la quantité de lumière et pour l'huile consommée, à 17 lampes Carcel. Mais la difficulté de construire des lentilles assez grandes, et en même temps la nécessité de leur donner peu d'épaisseur, afin d'éviter l'absorption de la lumière, forcèrent Fresnel à adopter un système particulier de lentilles dues à Buffon, et connues sous le nom de ***lentilles à échelons***.

Vues de face dans la figure 201 et de profil dans la figure 202, elles se composent d'une lentille plan-convexe A, de 30 centimètres de diamètre, autour de laquelle sont disposés, au nombre de huit ou dix, des anneaux de verre qui sont aussi plan-convexes et dont la courbure est calculée de manière que chacun ait le même foyer que la lentille centrale A. Une lampe étant placée au foyer L de ce système réfringent (fig. 202), il en résulte un immense faisceau horizontal RC qui va porter au loin la lumière. En outre, en dessus et en dessous de ces lentilles sont disposés des miroirs de verre étamés *mn* formant plusieurs étages. De la sorte, les rayons qui iraient se perdre vers le ciel et vers la terre sont utilisés et renvoyés dans la direction horizontale.

Par cette double combinaison, on obtient un vaste faisceau horizontal qui propage la lumière de la lampe jusqu'à 16 et même 20 lieues, mais ne la porte que dans une direction. Pour multiplier les points de l'horizon pour lesquels la lumière est visible, Fresnel, au lieu du seul système de lentilles et de miroirs représenté dans la figure 202, en a réuni huit semblables sous la forme d'une énorme pyramide de verre à huit faces, comme on le voit dans la figure 203, qui montre un phare de premier ordre, construit par M. Sautter, et qui a excité l'admiration des visiteurs à l'exposition universelle de 1855. Le système des miroirs et des lentilles seul a 3 mètres de hauteur.

Construit comme on vient de le voir, un phare éclaire fortement huit points de l'horizon, mais tous les autres points sont privés de lumière; en sorte que, pour les vaisseaux naviguant dans ces parties obscures, le phare ne serait d'aucun secours. Fresnel a

levé cette difficulté au moyen d'un mécanisme fort simple représenté dans la partie inférieure de la figure 203. Un mouvement d'horlogerie M, mû par un poids P, imprime à tout le système len-



Fig. 203. — Coupe d'un phare de premier ordre.

ticulaire AB un mouvement de rotation lent sur six galets. Pendant une révolution complète de l'appareil, tout l'horizon se trouve donc successivement éclairé, et le navigateur perdu dans la nuit voit apparaître huit fois *le feu*, et huit fois disparaître. Ces apparitions et disparitions, qui ont reçu le nom d'*éclipses*, ont été utilisées

pour distinguer les phares entre eux, en faisant varier pour chacun le nombre des éclipses dans un temps donné.

Les phares étant visibles d'autant plus loin qu'ils sont plus élevés,



Fig. 204. — Éclairage des phares.

on les dispose, comme le montre la figure 204, sur des tours dont la hauteur varie de 50 à 80 mètres. Les côtes de France et d'Angleterre, des deux côtés de la Manche, sont ainsi illuminées par de nombreux phares comme nos boulevards le sont par des becs de gaz.

Nous reviendrons bientôt sur les propriétés des lentilles en décrivant leur importante application aux instruments d'optique, tels que les lunettes, les télescopes, les microscopes, etc.; mais auparavant il importe de faire connaître les brillants phénomenes de coloration que présentent les prismes lorsqu'ils sont traversés par un faisceau lumineux.

CHAPITRE V

DÉCOMPOSITION DE LA LUMIÈRE PAR LES PRISMES.

293. **Spectre solaire.** — En traitant des prismes et des lentilles, nous n'avons considéré que le changement de direction que ces milieux transparents impriment aux rayons lumineux, et les images diverses qui en résultent. Or, quand un faisceau de lumière solaire passe au travers d'un prisme, il n'est pas seulement dévié à l'entrée et à la sortie, il est en outre ***décomposé en plusieurs espèces de lumières diversement colorées***, phénomène remarquable, connu sous le nom de ***dispersion*** de la lumière, et que l''on constate par l'expérience suivante, due à Newton.

Par un petit trou, pratiqué dans le volet d'une chambre obscure, on fait entrer un faisceau de lumière solaire qu'on reçoit sur un prisme de verre disposé horizontalement, comme le montre la figure 205. On a déjà vu (fig. 182, page 333) que tous les rayons qui composent ce faisceau se réfractent deux fois dans le même sens, à l'entrée et à la sortie du prisme; mais ce que l'expérience actuelle nous apprend, c'est qu'ils se réfractent inégalement. En effet, au lieu d'aller former, sur un écran éloigné, une image circulaire de même forme que l'ouverture, ces rayons donnent lieu à une image très-allongée dans le sens vertical, ce qui fait voir que le faisceau, d'abord circulaire, s'est fortement dilaté dans le sens de la réfraction. De plus, l'image allongée qu'on reçoit sur un écran blanc, au lieu d'être incolore, présente, dans le sens de sa longueur, les belles couleurs de l'arc-en-ciel, avec un éclat et une richesse de tons dont on ne peut se faire une idée sans l'avoir vue. Cette bril-

lante image, dont la reproduction constitue une des plus belles expériences d'optique, a reçu le nom de ***spectre solaire.***

Il existe en réalité, dans le spectre, une infinité de teintes, mais Newton en a distingué sept principales qui sont, de haut en bas, dans la figure ci-dessous, les suivantes :

Violet, indigo, bleu, vert, jaune, orangé, rouge.

D'après l'ordre dans lequel les couleurs sont disposées dans

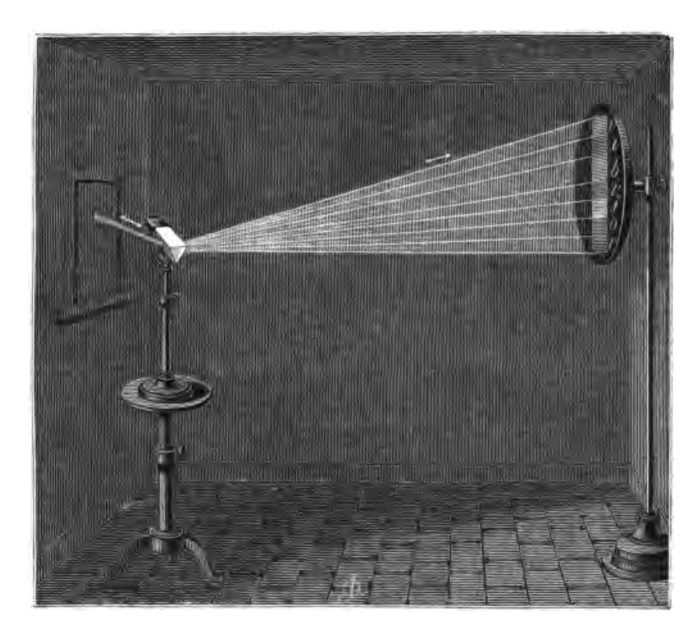


Fig. 205. — Spectre solaire.

le spectre, on reconnaît que c'est la couleur violette qui s'est réfractée davantage, ce qu'on exprime en disant qu'elle est la plus ***réfrangible;*** et on voit que le degré de réfrangibilité va en décroissant ensuite jusqu'au rouge, cette couleur étant la moins déviée.

De l'expérience du spectre solaire, Newton a conclu que la lumière *blanche*, c'est-à-dire la lumière ordinaire qui nous vient

du soleil, n'est pas homogène, n'est pas simple, mais composée de sept lumières différentes qui, réunies, donnent du blanc, tandis que séparées elles donnent chacune une couleur propre; et il a expliqué la séparation de ces sept lumières, à leur passage dans le prisme, par leur inégal degré de réfrangibilité. En effet, si elles étaient également réfrangibles, s'infléchissant également à l'entrée dans le prisme et à la sortie, elles le traverseraient sans se séparer, et la lumière serait blanche à l'émergence comme à l'incidence

294. **Les sept couleurs du spectre sont simples.** — Si l'on reçoit l'un quelconque des faisceaux du spectre, le faisceau jaune, par exemple, sur un second prisme, il est bien encore dévié, mais sans décomposition; c'est-à-dire qu'il ne donne lieu qu'à un seul faisceau émergent, qui est jaune comme lui. La même chose ayant lieu pour toutes les autres couleurs du spectre, on en conclut qu'elles sont indécomposables par le prisme; ce qu'on exprime en disant que les sept couleurs du spectre sont des *couleurs simples* ou des *couleurs primitives.*

Quant à la cause en elle-même en vertu de laquelle telle partie du spectre fait naître en nous la sensation du rouge, telle autre, la sensation de l'orangé, du jaune, etc., la théorie des ondulations nous apprend qu'il faut la rapporter au nombre des vibrations exécutées par les molécules de l'éther. Ce nombre, qui est extrêmement considérable, diffère pour chaque couleur du spectre et va en croissant du rouge au violet. On a calculé que, pour le rouge extrême, il est de 458 millions de millions par seconde, et, pour le violet, de 727 millions de millions. La couleur d'une lumière dépendant ainsi du nombre des vibrations, son intensité, au contraire, dépend de l'étendue de ces mêmes vibrations, étendue toujours excessivement petite; en effet, le calcul fait voir que, pour le rouge, l'étendue d'une vibration est de 620 millioniémes de millimètre, et pour le violet, de 425.

295. **Propriétés lumineuses, calorifiques et chimiques du spectre.** — Les sept faisceaux du spectre ne diffèrent pas seulement par leur coloration, mais encore par leur pouvoir éclairant, par la chaleur qui les accompagne, et enfin, par les effets chimiques auxquels ils donnent naissance. Si on les étudie d'abord par rapport à leur

faculté illuminante, on trouve que ce sont les faisceaux moyens, c'est-à-dire le vert et le jaune, qui éclairent le plus fortement. Par exemple, les caractères d'un livre placés dans le faisceau jaune sont vus de plus loin et plus distinctement que dans le rouge ou le violet.

Pour étudier la faculté calorifique des divers faisceaux, on place un thermomètre très-sensible successivement dans les diverses parties du spectre, et on observe que c'est dans le rouge, et même un peu au delà, que la chaleur atteint sa plus grande intensité; ce qui prouve l'existence de rayons calorifiques invisibles, moins réfrangibles que tous les autres rayons du spectre.

Si nous passons de l'action calorifique de la lumière à son action chimique, nous remarquons d'abord qu'elle tend à détruire la plupart des couleurs végétales, comme le montrent journellement les étoffes et les papiers peints, qui *passent* rapidement à la lumière. En chimie, il est des substances qui, blanches naturellement, noircissent par l'action des rayons lumineux, et certains mélanges gazeux qui font subitement explosion lorsqu'on les expose aux rayons solaires. Ce sont là autant d'effets chimiques, mais qui ne sont pas produits également par tous les faisceaux du spectre; c'est dans le violet et même un peu au delà que s'exerce l'action chimique de la lumière.

En résumant ce qui précède, on voit donc que c'est dans l'extrême rouge que se rencontre la propriété calorifique; dans le jaune, le pouvoir éclairant; et dans l'extrême violet, l'action chimique.

296. **Recomposition de la lumière blanche.** — Après avoir décomposé, à l'aide du prisme, la lumière blanche en sept autres lumières diversement colorées, il est curieux de vérifier si réciproquement on peut reproduire de la lumière blanche par la réunion des sept couleurs du spectre. C'est ce que prouvent les nombreuses expériences suivantes :

1° On fait passer un faisceau de lumière solaire au travers d'un prisme, comme dans la figure 205, puis on reçoit le spectre, non plus sur un écran, mais sur une lentille biconvexe un peu grande (fig. 206), au foyer de laquelle on place un petit écran en verre dépoli ou en carton. Les sept couleurs du spectre allant alors concourir au foyer, on voit se former sur l'écran une image cir-

culaire parfaitement blanche, ce qui prouve que la réunion des sept lumières du spectre reproduit la lumière blanche.

2° On arrive au même résultat en remplaçant la lentille biconvexe de l'expérience ci-dessus par un miroir concave. Les sept

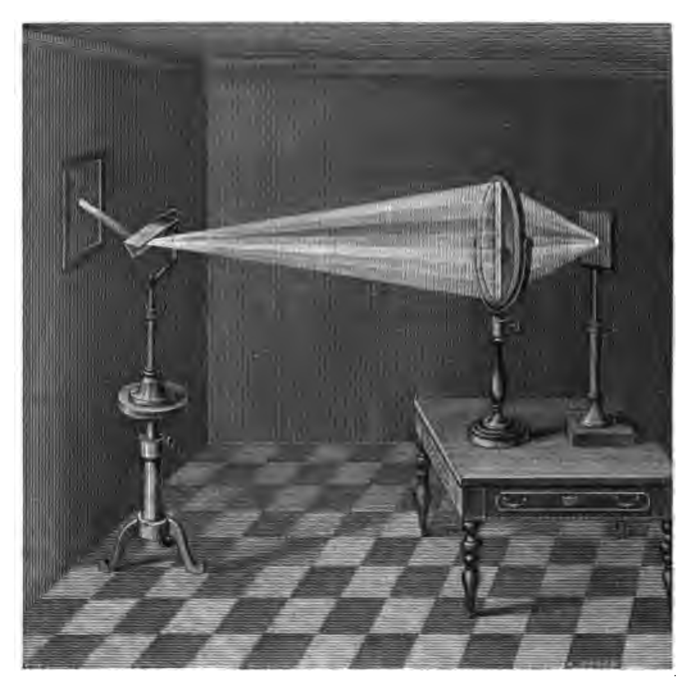


Fig. 206. — Recomposition de la lumière.

faisceaux colorés se réfléchissant sur ce miroir, c'est à son foyer que se forme la même image blanche que dans l'expérience précédente.

3° On fait encore voir que la réunion des sept couleurs du spectre donne du blanc par la belle expérience suivante due à Newton. Sur un disque de carton, on colle, à partir du centre, successivement des bandes de papier rouge, orangé, jaune, vert, bleu, indigo et violet, de manière à simuler plusieurs spectres solaires à la suite

les uns des autres (fig. 207); puis, fixant le disque sur un axe horizontal, on lui imprime un mouvement de rotation rapide, au moyen du mécanisme représenté dans la figure 208. Or, on voit

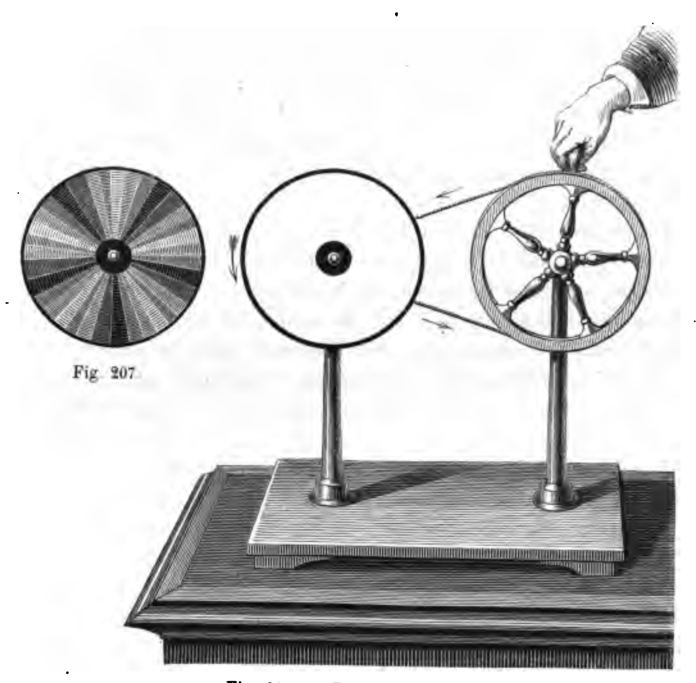


Fig. 208. — Disque de Newton.

alors, non sans étonnement, les couleurs s'évanouir et le disque paraître entièrement blanc.

Pour expliquer ce phénomène, observons que l'impression que produit sur l'œil la vue d'un corps lumineux se prolonge un instant après la cause qui l'a produite. Par exemple, lorsqu'on fait tourner avec rapidité un charbon incandescent, on voit un cercle complet de feu, ce qui prouve que la sensation produite sur l'œil persiste encore après le passage du charbon devant cet organe. Cela posé,

lorsque dans l'expérience ci-dessus le disque tourne assez vite pour que la sensation des sept couleurs soit simultanée, l'œil est affecté comme s'il les recevait toutes ensemble, et, dès lors, le disque lui paraît blanc.

297. **Théorie de Newton sur la coloration des corps opaques.** — La décomposition de la lumière blanche par le prisme a conduit Newton à cette conséquence curieuse sur la coloration des corps, que ceux-ci ne sont point colorés par eux-mêmes, n'ont point de couleur propre, mais qu'ils possèdent seulement la propriété de décomposer la lumière blanche qui les éclaire, en réfléchissant inégalement les diverses espèces de lumières dont elle est formée. Par exemple, le vermillon n'est pas rouge en lui-même, il n'est que doué de la propriété de réfléchir la lumière rouge et d'absorber toutes les autres, ou du moins de ne les réfléchir qu'en proportion beaucoup moindre. De même, les feuilles des plantes ne sont point vertes, elles ont seulement pour la lumière verte un pouvoir réfléchissant beaucoup plus grand que pour les autres lumières. En un mot, les corps ne sont colorés que par la lumière qu'ils réfléchissent. En effet, portez ces mêmes feuilles vertes dans le spectre solaire, au milieu d'une chambre obscure; si vous les placez dans la bande verte, elles paraîtront d'un vert éclatant, beaucoup plus beau que leur couleur naturelle; mais placez-les dans la bande rouge, elles paraîtront rouges; dans la bande violette, elles seront violettes. De même, faites passer une rose successivement dans chacune des bandes du spectre, et vous la verrez alternativement rouge, orangée, jaune, verte, bleue, indigo et violette; ce qui prouve bien que la couleur des corps ne leur est pas propre, mais dépend uniquement de l'espèce de lumière que leur constitution moléculaire leur donne la propriété de réfléchir; et encore n'est-ce pas cette lumière réfléchie qui est colorée! Nous disons bien, pour nous conformer au langage ordinaire, *le faisceau rouge*, *le faisceau jaune*,... mais ce n'est là qu'une manière de parler. Les différents faisceaux qui composent le spectre ne sont pas plus colorés que ne le sont les corps; seulement, d'après le nombre de vibrations de l'éther correspondant à chacun d'eux, ils possèdent la propriété de faire naître en nous la sensation du rouge, du jaune, etc. En un mot, l'œil juge des couleurs comme

l'oreille des sons, par le nombre des vibrations; en sorte qu'on pourrait dire la *gamme des couleurs* comme on dit la gamme des sons. Il est du reste remarquable que, de même que la gamme se compose de sept notes, le spectre solaire se compose de sept couleurs.

Quant aux corps qui réfléchissent également bien les sept couleurs du spectre, ils sont blancs; ceux qui n'en réfléchissent aucune sont noirs; en sorte que le noir n'est pas, en réalité, une couleur, mais la privation de toute couleur. Quant aux nuances si variées que nous offrent les corps colorés, elles résultent non-seulement de ce que ceux-ci réfléchissent à la fois plusieurs espèces de lumières, mais cela à des degrés très-divers. Par exemple, un corps qui réfléchira la lumière jaune et la lumière bleue, sera vert; mais d'un vert qui variera avec les quantités de lumière jaune et de lumière bleue que le corps réfléchit. En effet, si l'on intercepte en totalité ou en partie, à l'aide d'un écran opaque, quelques-unes des couleurs du spectre et qu'on réunisse les autres au moyen d'une lentille, comme dans la figure 206, il n'est pas de nuance dans la nature qu'on ne puisse reproduire, mais avec un éclat et une richesse de tons que les couleurs artificielles ne peuvent jamais atteindre.

298. **Coloration des corps diaphanes.** — On a vu ci-dessus que les corps opaques deviennent colorés en décomposant la lumière par réflexion, c'est-à-dire en réfléchissant certaines couleurs du spectre plus abondamment que d'autres; or, c'est aussi en décomposant la lumière que les corps diaphanes nous paraissent colorés, seulement ici la décomposition a lieu non plus par réflexion, mais par transmission. Si tous les rayons du spectre étaient également transmissibles par les milieux diaphanes, ceux-ci seraient nécessairement incolores; or, c'est ce qui n'a jamais lieu, du moins quand ces milieux ont une épaisseur suffisante; ils absorbent alors certaines couleurs du spectre plus que d'autres, et prennent la teinte du faisceau le plus transmissible. L'eau, par exemple, vue par transmission, sous une grande épaisseur, prend une teinte verdâtre, ce qui prouve qu'elle laisse passer la couleur verte plus facilement que les autres couleurs contenues dans la lumière blanche.

L'air, sous une très-grande épaisseur, donne une teinte bleuâtre aux objets lointains, ce qui tendrait à prouver que l'air est plus diaphane pour le bleu que pour les autres couleurs du spectre. Cependant, comme il nous transmet sans altération la lumière blanche du soleil, la couleur bleue de la voûte céleste doit plutôt être attribuée aux innombrables réflexions que subit, sur les molécules de l'air, la lumière diffuse renvoyée dans toutes les directions par les objets terrestres.

299. **Couleurs complémentaires, images accidentelles.** — Newton a nommé *couleurs complémentaires* les couleurs qui par leur mélange forment du blanc. En effet, mélangez, à l'aide d'une lentille biconvexe, toutes les couleurs du spectre, moins le rouge, vous aurez, au lieu de blanc, une teinte vert bleuâtre; puis, réunissez, sur un écran, cette teinte avec le faisceau rouge qui a été isolé, et vous aurez du blanc. Le vert est donc la couleur complémentaire du rouge; de même le bleu est complémentaire de l'orangé, le violet du jaune.

On rencontre des effets de couleurs complémentaires dans plusieurs expériences curieuses. Par exemple, collez sur un fond noir un objet coloré, un pain à cacheter, je suppose, regardez-le fixement quelques minutes, jusqu'à ce que la vue soit fatiguée; puis dirigez aussitôt les yeux sur une feuille de papier blanc, vous verrez alors une image de même forme que l'objet, mais colorée d'une couleur complémentaire; c'est-à-dire que si le pain à cacheter est rouge, son image est verte; s'il est orangé, elle est bleue, et ainsi de suite. De même, si on contemple fixement le soleil couchant, qui est rouge, et qu'ensuite on regarde un mur blanc, on voit un disque vert intense qui persiste quelques instants, puis l'image rouge reparaît; une seconde image verte lui succède, et ainsi de suite un assez grand nombre de fois jusqu'à ce que toute apparition s'évanouisse.

Ces images qui persistent ainsi après qu'on a contemplé pendant un certain temps un objet, et qui ont pour caractère de présenter les couleurs complémentaires de celles de cet objet, ont été signalées pour la première fois par Buffon, qui leur a donné le nom d'*images accidentelles*.

Il est encore un autre exemple de couleurs accidentelles signa-

lées aussi par Buffon : lorsqu'on regarde assez longtemps un objet coloré, placé sur un fond blanc, on aperçoit bientôt cet objet entouré d'une auréole dont la couleur est complémentaire de celle de l'objet. Ce phénomène, connu sous le nom d'*auréole accidentelle*, se vérifie facilement au moyen d'un pain à cacheter collé sur une feuille de papier blanc.

De nombreux effets de coloration se rattachent aux images et aux auréoles accidentelles; telle est la coloration des ombres. Par exemple, sur un mur blanc, au lever et au coucher du soleil, on observe que les ombres sont vertes si le soleil est rouge, et bleues s'il est orangé.

Lorsqu'on examine successivement plusieurs pièces d'étoffe de même couleur, on remarque que les dernières paraissent d'une mauvaise nuance ; cela est dû à ce que la couleur accidentelle de l'étoffe commençant à se former, la teinte perd de sa vivacité. De même, lorsqu'on imprime des dessins ou qu'on brode des étoffes sur des fonds colorés, la couleur du dessin est modifiée par la complémentaire de celle du fond, d'où peuvent résulter des effets tout à fait opposés à ceux qu'on voulait obtenir. En général, deux couleurs voisines sont-elles complémentaires, elles acquièrent l'une et l'autre un plus grand éclat, mais si elles sont de même teinte, elles s'affaiblissent mutuellement. On conçoit donc combien le phénomène des images accidentelles présente d'applications pour l'assortiment des couleurs dans les teintures, les papiers peints, les tapis, les meubles, dans la toilette même, quoiqu'il soit vrai que le goût ait depuis longtemps devancé les données de la science. Pour plus de détails sur cette matière, on peut consulter l'ouvrage *du Contraste des couleurs*, par M. Chevreul, directeur de la fabrique des Gobelins.

300. **Arc-en-ciel.** — Nous compléterons ce qui précède sur les brillants phénomènes que présentent les couleurs du spectre, en faisant connaître la cause de l'*arc-en-ciel* ou *iris*, ce magnifique symbole de réconciliation, dont Dieu dit dans la Genèse : « Je mettrai mon arc dans les nuées, afin qu'il soit le signe de l'alliance que j'ai faite avec la terre » ; paroles dont un poëte conserve le souvenir dans les vers suivants :

Sept rubans colorés composent ce portique,
Qui, simple en ses contours, mais d'un aspect magique,
Semble aux fils de la terre une porte des cieux.

L'arc-en-ciel ne se formant que sur les nuées qui se résolvent en pluie et présentant toujours toutes les couleurs du spectre, exactement dans le même ordre, cela indique évidemment une



Fig. 209. — Théorie de l'arc-en-ciel.

décomposition de la lumière blanche du soleil par les gouttelettes de pluie. De plus, comme l'arc-en-ciel n'est visible que pour l'observateur qui, regardant la nuée, tourne le dos au soleil, on en conclut qu'il faut que la lumière, d'abord décomposée à son entrée dans les gouttes de pluie, soit ensuite réfléchie vers l'observateur. C'est donc à un double effet de réfraction et de réflexion qu'il faut attribuer la formation de l'arc-en-ciel.

Pour interpréter ce double phénomène, reportons-nous à la figure 209, dans laquelle sont représentées, en *a* et en *b*, deux gouttelettes de pluie extrêmement amplifiées par rapport à l'arc dont elles font partie. Le faisceau de lumière blanche qui tombe sur la gouttelette *a*, se réfracte et se décompose à son entrée dans cette gouttelette, en donnant naissance à sept rayons, rouge, orangé,

jaune, vert, bleu, indigo et violet (293). Au point *a*, sur la face postérieure de la gouttelette, une portion de cette lumière réfractée s'échappe et se disperse dans l'atmosphère, sans donner naissance à aucun phénomène particulier; quant à la lumière qui n'est pas sortie de la gouttelette, elle se réfléchit en *a*, revient en avant, et sort en se réfractant une seconde fois pour parvenir enfin à l'œil de l'observateur, comme le représente la figure.

Une seconde gouttelette *c*, placée au-dessous de la précédente, produit un effet entièrement semblable; seulement ce n'est pas la même couleur du spectre qu'elle envoie à l'observateur. En effet, les différentes couleurs étant inégalement réfrangibles, les rayons colorés qui sortent d'une même goutte de pluie sont divergents et, par suite, ne se propagent pas ensemble; d'où il resulte que chaque goutte n'envoie vers l'observateur qu'une espèce de couleur. Or, d'après le degré de réfrangibilité de chaque rayon du spectre, les gouttelettes placées sur le pourtour extérieur de l'arc n'envoient à l'œil que des rayons rouges; les gouttelettes situées sur le pourtour intérieur, des rayons violets. Les autres couleurs proviennent des gouttelettes intermédiaires.

En résumé, l'arc-en-ciel est la base d'un cône dont l'œil de l'observateur est le sommet; et la surface de ce cône est formée, de l'extérieur à l'intérieur, de sept faisceaux, rouge, orangé, jaune..., correspondant à chacune des bandes du spectre. Plus le soleil est près de l'horizon, plus est grande la partie visible de l'arc-en-ciel; mais à mesure que l'astre s'élève, l'arc diminue, et il disparaît tout à fait lorsque le soleil est élevé de 42 degrés au-dessus de l'horizon. C'est pour cette raison qu'on ne voit jamais d'arc-en-ciel que le matin et le soir.

CHAPITRE VI.

EFFETS NUISIBLES DE COLORATION DANS LES LENTILLES, ACHROMATISME.

301. **Aberration de réfrangibilité.** — En faisant connaître les propriétés des lentilles, nous avons passé sous silence un inconvé-

nient grave qu'elles présentent : c'est qu'à une certaine distance, les objets vus à travers ces verres paraissent entourés d'une frange irisée, qui fatigue la vue et nuit beaucoup à la netteté des images.

Ce phénomène, dont nous n'aurions pu donner la cause avant d'avoir fait connaître la décomposition de la lumière par les prismes, est maintenant facile à expliquer. Pour cela, observons que les lentilles, agissant sur la lumière à la manière des prismes, n'impriment pas seulement une déviation au faisceau lumineux qui les traverse, mais qu'elles le décomposent dans les sept couleurs du spectre. Il ne se produit donc pas un foyer unique, comme nous l'avons admis jusqu'ici, mais sept foyers distincts, dont un pour chaque couleur simple. En effet, les rayons violets, qui sont les plus réfrangibles, s'infléchissant davantage, à l'entrée et à la sortie, vont converger en *v* assez près de la lentille (fig. 210) ; tandis que les rayons rouges, s'infléchissant moins, vont concourir plus loin en *r*. Entre les points *v* et *r* se forment les foyers indigo, bleu, vert, jaune et orangé. On voit donc qu'une lentille biconvexe tend à donner, de l'objet qu'on regarde au travers, sept images inégalement colorées. Ces images se superposant en partie, les sept couleurs se recombinent dans la partie centrale sans nuire à la netteté de la vision, mais sur les contours restent les couleurs extrêmes du spectre, c'est-à-dire surtout le rouge et le bleu.



Fig. 210.

Cette coloration fâcheuse des images est connue sous le nom d'*aberration de réfrangibilité*. Nous allons voir comment on parvient à la corriger dans les instruments d'optique.

302. **Lentilles achromatiques.** — Newton ayant annoncé, d'après des expériences qu'il avait faites à ce sujet, que la lumière ne pouvait être déviée sans se décomposer, on admit longtemps que le défaut de coloration que présentent les lentilles était irrémédiable. Mais Dollond, opticien anglais, ayant reconnu que certains verres, doués de pouvoirs réfringents différents, pouvaient cependant *disperser* également la lumière, c'est-à-dire donner au spectre le

même épanouissement, conçut la possibilité de réfracter les rayons, pour avoir des images, sans séparer les couleurs. Pour cela, il réunit, comme le montre la figure 211, une lentille biconvexe en verre à glace ordinaire (en anglais *crown-glass*) avec une lentille biconcave en *flint*, sorte de cristal qui contient beaucoup de plomb, et est plus dispersif que le crown. Or, en combinant convenablement les courbures de ces deux lentilles, elles peuvent devenir également dispersives, et comme la dispersion a lieu en sens inverse, l'une des lentilles étant convergente et l'autre divergente, il en résulte deux effets qui se compensent quant à la coloration, mais non quant à la réfraction; c'est-à-dire qu'un faisceau de lumière blanche qui traverse les lentilles, en sort sans coloration mais encore convergent, et va former sur l'axe un foyer unique.

Fig. 211.

Les lentilles ainsi formées de flint et de crown donnant des images sans irisation sur leurs bords, on leur a donné le nom de ***lentilles achromatiques***, de deux mots grecs qui signifient ***sans couleurs***, et on désigne sous le nom d'***achromatisme*** la théorie de ces lentilles.

303. **Aberration de sphéricité.** — L'aberration de réfrangibilité n'est pas le seul défaut que présentent les lentilles; elles offrent encore une autre aberration connue sous le nom d'***aberration de sphéricité***, et qui consiste en ce que, même en faisant abstraction de la dispersion, les rayons qui traversent une lentille convergente ne vont pas rigoureusement concourir en un foyer unique. Ceux qui traversent la lentille près des bords se réfractent trop par rapport à ceux qui la traversent dans sa partie centrale, d'où il résulte que les premiers rayons vont concourir plus près de la lentille que les derniers, défaut de concordance qui déforme les images.

On obvie à cet inconvénient, dans les instruments d'optique, en interceptant les rayons qui traversent les lentilles près des bords, à l'aide de diaphragmes percés de trous circulaires qui ne laissent passer que les rayons voisins de l'axe.

CHAPITRE VII.

APPLICATIONS DES PROPRIÉTÉS DES LENTILLES ET DES MIROIRS.

304. **Instruments d'optique.** — Les propriétés des lentilles et des miroirs ont conduit les physiciens à la construction d'appareils d'optique qui ont prodigieusement reculé les limites de la vision, et ont eu ainsi la plus heureuse influence sur les progrès des sciences, en nous dévoilant deux mondes nouveaux, qui autrement nous seraient restés éternellement inconnus, l'un par son extrême petitesse, l'autre par son immensité même. De ces appareils, qui sont connus sous le nom général d'***instruments d'optique***, et qui ne sont que des combinaisons de lentilles seules ou de lentilles et de miroirs, les plus utiles sont les ***microscopes***, ainsi nommés de deux mots grecs qui signifient ***voir de petites choses***, et les ***télescopes***, mot qui signifie ***voir de loin***. Dans cette dernière classe d'instruments doivent se ranger la ***lunette astronomique***, la ***lunette terrestre*** ou ***longue-vue***, la ***lunette de spectacle*** ou ***lorgnette***, qui servent aussi à voir de loin, mais qui cependant diffèrent du télescope proprement dit, comme on le verra bientôt. Enfin, on a encore imaginé de nombreux appareils d'optique, les uns dans un but d'utilité, les autres dans un but de récréation; tels sont la ***lanterne magique***, la ***fantasmagorie***, le ***microscope solaire***, le ***microscope photo-électrique***, la ***chambre noire*** et le ***Daguerréotype***.

305. **Composition générale des instruments d'optique.** — Des divers instruments énumérés ci-dessus, ceux du premier groupe, les lunettes et les microscopes, sont tous essentiellement composés de deux verres lenticulaires : l'un, nommé ***objectif***, reçoit la lumière des objets et la concentre en un foyer où il en donne une petite image; l'autre, qu'on nomme ***oculaire***, faisant office de loupe, est placé près de l'œil et sert à regarder l'image formée par le premier verre. Dans les télescopes proprement dits, l'objectif est remplacé par un miroir concave. Le plus souvent, l'objectif et

l'oculaire ne sont pas formés chacun d'un seul verre, comme nous venons de le supposer, mais de plusieurs, afin d'obtenir un grossissement plus considérable et aussi de corriger les aberrations de sphéricité et de réfrangibilité. Enfin, ces différents verres sont montés dans de longs tuyaux noircis à l'intérieur, afin d'absorber les rayons obliques qui nuiraient à la netteté des images; de plus, ils peuvent glisser les uns dans les autres, ce qui sert à rapprocher ou à écarter les verres entre eux pour approprier l'instrument à la distance des objets qu'on regarde et en même temps à la vue de l'observateur.

Quant aux instruments du second groupe, la lanterne magique, la fantasmagorie et le microscope solaire, ils sont bien encore composés de deux verres lenticulaires, tous les deux convergents, mais dont l'usage n'est plus le même que ci-dessus. En effet, il ne s'agit plus ici de regarder l'objet au travers un oculaire, mais de projeter son image très-amplifiée sur un écran. Pour cela, le premier verre, qui est à grand diamètre, ne fait que concentrer une grande quantité de lumière sur l'objet pour l'éclairer fortement, tandis que le second verre va ensuite projeter sur un écran l'image de l'objet.

306. **Lunette de Galilée ou lunette d'approche.** — Comme la plupart des grandes découvertes, celle de la lunette d'approche paraît due au hasard. Elle est attribuée, en effet, à deux enfants, fils, suivant les uns, de Zacharie Jans, et, suivant les autres, de Lippershey, lunetiers l'un et l'autre à Middlebourg. Vers l'an 1600, ces enfants s'étant avisés de regarder le coq qui surmontait le clocher de leur église, au travers d'un verre convexe et d'un verre concave, ce dernier placé près de l'œil, poussèrent des cris de surprise en voyant le coq grossi et à la portée de la main. Attiré par les exclamations de ses enfants, le père répète l'expérience avec le même succès; puis, pour la faciliter, il fixe les deux verres dans deux tuyaux susceptibles d'entrer l'un dans l'autre, et dès lors la lunette est trouvée. Cependant, elle porte le nom de Galilée, parce que c'est cet illustre astronome qui, le premier, la dirigea vers le ciel, et l'appliqua aux observations astronomiques.

On rapporte que Galilée était à Venise lorsqu'il apprit que Zacharie Jans avait offert au prince Maurice de Nassau un instrument

qui rapprochait beaucoup les objets; il part aussitôt pour Padoue, se recueille, expérimente, et en vingt-quatre heures, dit-on, retrouve la lunette de Zacharie.

Les lunettes construites par Galilée donnèrent successivement un grossissement de quatre, sept et trente fois, et il ne tarda pas à découvrir avec elles les satellites de Jupiter, les montagnes de la lune, les taches du soleil. Ces nombreuses découvertes lui firent donner le surnom de *Lynceus*, par allusion à Lyncée, un des Argonautes, dont la vue était si perçante qu'il voyait, dit-on, au fond des mers; mais, dans sa vieillesse, le célèbre astronome fut frappé de cécité, comme si le ciel eût voulu punir le téméraire qui, le premier, avait osé scruter ses profondeurs.

La figure 212 représente la disposition des lentilles et la marche

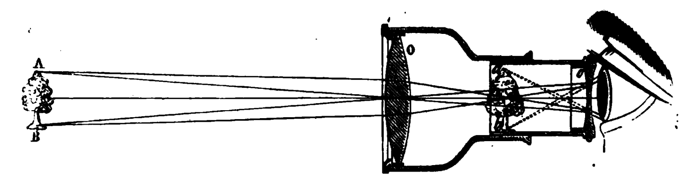


Fig. 212. — Marche des rayons dans la lunette de Galilée.

des rayons dans la lunette de Galilée. L'objectif *o* est biconvexe, tandis que l'oculaire O est biconcave. L'objet qu'on observe étant AB, les rayons partis de l'un quelconque de ses points, de A par exemple, tendent à aller former l'image de ce point au delà de l'oculaire *o;* mais rencontrant la lentille biconcave O, ces rayons deviennent divergents, et pour l'œil qui les reçoit, ils paraissent partis du point *a;* c'est donc là qu'apparaît l'image du point A. De même l'image de B va se former en *b;* d'où résulte une image virtuelle *ab,* redressée et très-rapprochée.

La lunette de Galilée a le double avantage de montrer immédiatement les objets dans leur position naturelle, et, en outre, d'être très-courte et très-portative. C'est ce qui l'a fait adopter pour les théâtres, sous le nom de *lorgnette* quand elle est simple, et sous celui de *jumelle* quand elle est double. Les jumelles, dont l'usage est aujourd'hui tout mondain, sont dues à un capucin, le père

Chérubin, en 1671. Ces lunettes grossissent peu; ordinairement deux fois et demie à trois fois.

Sous le nom de *jumelles mégascopiques*, M. Charles Chevalier construit depuis quelques années des jumelles d'une grande perfection sous le point de vue du grossissement, de la pureté des verres et de l'absence de toute aberration de sphéricité et de réfrangibilité (302 et 303).

307. **Lunette astronomique.** — Si la lunette de Galilée a l'avantage de faire voir les objets dans leur position naturelle, elle a le désavantage de n'avoir qu'un très-petit *champ*, c'est-à-dire de n'embrasser qu'une portion très-limitée de l'espace, ce qui est dû à la divergence des rayons à la sortie de l'oculaire, divergence qui nécessite même que l'œil soit très-près de ce verre, sinon le champ

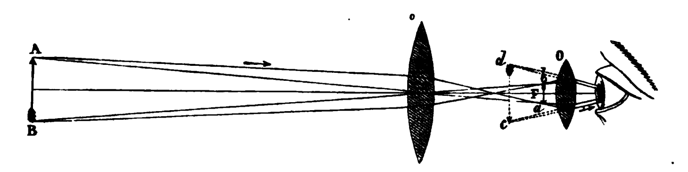


Fig. 213. — Marche des rayons dans la lunette astronomique.

est encore plus petit. C'est ce qui fait que pour l'observation des astres on a universellement substitué à la lunette de Galilée une lunette à deux verres convergents, qui est due à Képler, et est connue sous le nom de *lunette astronomique*. Cette lunette fait voir les objets renversés, mais ce renversement est sans inconvénient pour l'observation des astres.

La figure 214 représente une lunette astronomique dont nous avons relevé le dessin dans les ateliers de M. Molteni. Elle est portée sur un pied de fonte et montée à charnière sur une colonne de même métal, de manière à pouvoir non-seulement prendre toutes les inclinaisons, mais à être dirigée vers tous les points de l'horizon, Enfin, à l'aide d'une manivelle et de deux roues dentées, on peut élever ou abaisser la lunette à volonté, suivant qu'on désire observer debout ou assis. Sur le côté de la lunette en est adaptée une plus petite, qu'on nomme *chercheur*, parce que grossissant moins que la grande, elle embrasse une étendue du ciel beaucoup

plus considérable, et, par suite, est plus propre à faire découvrir l'astre qu'on cherche pour l'observer ensuite avec la grande lunette.

La figure 213 représente la disposition des verres et la marche



Fig. 214. — Lunette astronomique.

des rayons dans la lunette astronomique. On voit qu'elle se compose de deux verres convexes : l'objectif *o*, qui est d'un grand diamètre et peu convergent, va former en *ab* une image renversée et très-petite de l'astre AB vers lequel est dirigée la lunette. C'est cette image qu'on regarde avec l'oculaire O, qui fait ici l'office de

loupe (289), et qui pour cela est placé de manière que l'image *ab* se trouve entre ce verre et son foyer principal F. De la sorte, l'observateur voit l'astre en *cd*, renversé, mais très-amplifié.

Comme dans la lunette de Galilée et dans toutes les autres lunettes, le porte-oculaire, c'est-à-dire le tube dans lequel est l'oculaire, peut glisser à frottement doux pour s'approcher ou s'écarter de l'image *ab*, afin de la faire voir à la distance de la vue distincte de l'observateur. Enfin, dans les fortes lunettes, l'oculaire n'est pas simple, comme dans la figure ci-dessus, mais composé de plusieurs verres dont le nombre va jusqu'à cinq, et qui ont pour objet, ainsi qu'on l'a déjà dit, non-seulement d'augmenter le grossissement, mais de corriger les aberrations de sphéricité et de réfrangibilité (301).

Le grossissement d'une lunette astronomique est d'autant plus considérable que l'objectif est moins convexe et d'un plus grand diamètre, et que l'oculaire, au contraire, est plus convexe. Le plus grand obstacle qu'on rencontre à la construction de ces sortes de lunettes est la fabrication des grands objectifs. Dans les plus puissantes qu'on ait construites jusqu'ici, l'objectif a 38 centimètres de diamètre et le grossissement peut aller jusqu'à 3000. Une semblable lunette a été construite il y a peu de temps, par MM. Lerebours et Secrétan, pour l'Observatoire de Paris.

308. **Lunette terrestre ou longue-vue.** — La lunette astronomique ayant l'inconvénient de faire voir les objets renversés, il

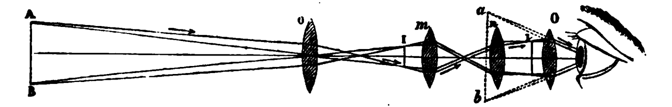


Fig. 215. — Marche des rayons dans la lunette terrestre.

importe, lorsqu'on veut observer des objets terrestres, de redresser l'image. On y parvient au moyen de deux lentilles convergentes qu'on interpose entre l'objectif et l'oculaire, comme le montre la figure 215. L'objectif *o* formant en I une image renversée de l'objet AB, les deux verres *m* et *n* impriment aux rayons lumineux qui les traversent une direction telle, qu'après s'être croisé entre

ces deux verres, les rayons vont reproduire l'image redressée en *i*. Là, l'oculaire O agit ensuite identiquement comme dans la lunette astronomique pour donner l'image *ab* très-rapprochée et amplifiée.

Ainsi modifiée, la lunette astronomique prend le nom de *lunette terrestre* ou *longue-vue*. Tantôt elle est portée sur un pied, de même que dans la figure 214; tantôt elle est sans pied, et alors l'observateur la tient avec les deux mains en la braquant vers l'objet qu'il veut voir. Elle est d'un usage continuel en mer et dans les ports pour reconnaître au loin les navires; en guerre, elle sert à observer les mouvements de l'ennemi; dans les maisons de campagne, lorsqu'on habite un lieu élevé, elle est un objet d'agrément pour les amateurs à qui elle fournit le plaisir d'observer à plusieurs lieues de distance.

309. **Télescopes.** — On a déjà vu (304) que le mot *télescope* signifie *voir de loin;* sous ce rapport, les différentes lunettes décrites jusqu'ici sont donc de véritables télescopes, et, en effet, elles ont d'abord porté ce nom. Mais aujourd'hui on n'applique plus cette dénomination qu'à des instruments composés de lentilles et de miroirs, et dont l'invention, postérieure aux lunettes, date de 1663 à 1672.

C'est dans cet intervalle de temps que parurent les premiers télescopes, ceux de Grégory et de Newton, qui diffèrent très-peu entre eux, et dont nous décrirons seulement le dernier, abandonné depuis longtemps, mais remis en vogue par les perfectionnements tout récents que M. Foucault vient d'apporter à la construction du miroir concave qui entre dans cet appareil.

La figure 216 représente un télescope de Newton, construit par M. Froment, avec de nombreux perfectionnements dus à cet habile physicien; la figure 217 donne une coupe du même appareil vu à vol d'oiseau, c'est-à-dire en dessus. La pièce principale de ce télescope est un miroir concave M, placé à l'extrémité d'un long tube de bois. Ce miroir était autrefois en métal poli, et c'est la difficulté de travailler de semblables miroirs pour leur donner une courbure parfaite qui avait fait abandonner les télescopes à réflexion. Mais M. Foucault ayant trouvé le moyen d'argenter le verre sans nuire à son poli, et cette substance se polissant mieux

que le métal et étant plus facile à travailler, le miroir des télescopes se construit aujourd'hui en verre poli qu'on argente sur la face concave même. Les rayons lumineux venant de l'astre qu'on

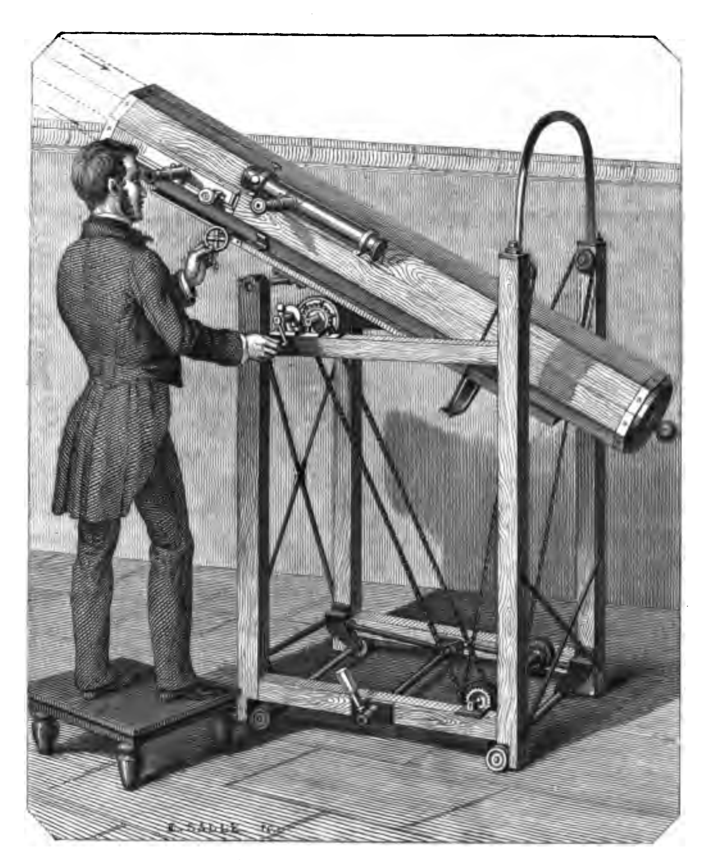


Fig. 216. — Télescope de Newton.

observe tombent sur ce miroir, s'y réfléchissent, et tendent à aller former à l'autre bout du tube une image réelle et très-petite de l'astre; mais avant les rayons rencontrent un petit prisme *mn*,

taillé de façon qu'ils y pénètrent sans se réfracter, et font avec la grande face *mn* un angle d'incidence tel qu'ils s'y réfléchissent au lieu de se réfracter au dehors (277). L'image vient donc se former en *ab* en avant du tube horizontal fixé sur le côté de l'instrument; or, dans ce tube est une série de verres grossissants qui font l'office d'oculaire et donnent de l'image *ab* une image virtuelle AB très-amplifiée.

La figure 216 montre comment on fait manœuvrer l'instrument : de la main droite l'observateur tient une manivelle qui transmet le mouvement à une chaîne sans fin, et celle-ci à deux autres chaînes qui s'enroulent sur des poulies, et servent à faire incliner

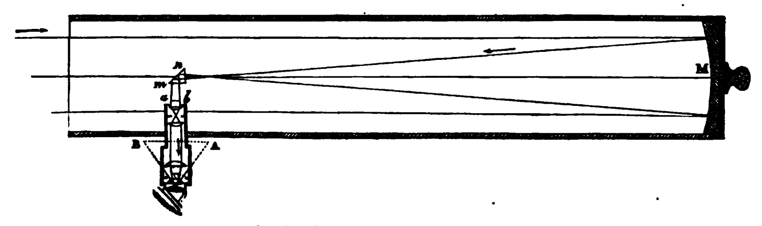


Fig. 217. — Marche des rayons dans le télescope de Newton.

plus ou moins le tube du télescope; de la main gauche, le même observateur tourne une petite roue fixée à une vis de rappel, qui sert à faire avancer lentement l'extrémité antérieure de l'appareil dans le sens latéral, de manière à suivre l'astre dans son mouvement. Enfin, un peu plus bas que l'oculaire, au-dessus de la petite roue, est un bouton dont l'usage est de faire marcher un petit pignon engrenant dans une crémaillère; celle-ci est fixée à une pièce mobile qui porte en même temps le prisme *mn* et l'oculaire (fig. 217). En tournant ce bouton dans un sens ou dans l'autre, le prisme et l'oculaire avancent jusqu'à ce que l'image *ab* se forme à la distance de la vue distincte de l'observateur.

Sur le côté du tube est un télescope plus petit, entièrement semblable au grand, mais beaucoup moins grossissant; c'est le *chercheur*. A cause de son faible grossissement, dix fois seulement, il embrasse une étendue du ciel beaucoup plus vaste, et, par suite, est plus favorable pour trouver l'astre qu'on veut observer. Quant

au grossissement du grand télescope, il peut varier de 50 à 800.

310. **Télescope d'Herschel.** — William Herschel, à Londres, a modifié le télescope de Newton, en inclinant légèrement le miroir M (fig. 217) par rapport à l'axe du tube, de façon que l'image *ab* aille se former au bord même de ce tube, à l'extrémité opposée au miroir. Là, tournant le dos à l'astre qu'il veut étudier, l'astronome observe cette image avec un oculaire grossissant, mais sa tête arrête une portion de la lumière dirigée vers le miroir.

Herschel a donné à son télescope des dimensions prodigieuses : 12 mètres de longueur et 1m,5 de diamètre. Il fallait tout un système d'échafaudage, de poulies et de cordages pour soutenir l'instrument et le diriger. Le grossissement du télescope d'Herschel a été estimé jusqu'à six mille fois; et c'est avec lui que sir John Herschel fils fit de si nombreuses découvertes qu'on répandit la nouvelle, il y a une vingtaine d'années, qu'il avait vu les habitants de la lune.



Fig. 218. — Loupe ou microscope simple.

Lord Ross, en Irlande, a encore dépassé les dimensions auxquelles Herschel s'était arrêté. En effet, il a fait construire un télescope de 1m,83 de diamètre, et 16m,76 de longueur; le miroir seul, qui est en métal, pèse 3809 kilogrammes, et l'instrument tout entier en pèse 15000. Il est porté sur des murs de 20 mètres de longueur et 14 de hauteur, et il a coûté 300 mille francs à son noble constructeur. « Qu'on se figure, écrit un spirituel astronome, l'œil d'un géant dont la prunelle aurait six pieds de diamètre ! »

311. **Microscopes.** — Les *microscopes* sont des instruments qui, donnant des images très-amplifiées, permettent d'observer des objets qui par leur petitesse échappent à l'œil nu. On en distingue

de deux sortes : le microscope simple et le microscope composé.

Le premier de ces instruments n'est autre chose qu'une petite lentille très-convergente employée comme verre grossissant, ainsi



Fig. 219. — Microscope composé.

qu'on l'a déjà vu dans la figure 197 (page 344). L'objet qu'on observe est alors placé entre la lentille et son foyer principal, et le grossissement est d'autant plus fort que la lentille est plus con-

vergente. Lorsque celle-ci est un peu grande, on la fixe ordinairement dans une monture de corne ou d'écaille, et alors, sous le nom de *loupe*, elle est d'un fréquent usage pour aider la vue des vieillards (fig. 218), ou pour faciliter certains travaux qui, comme dans l'horlogerie et dans l'art de la gravure, exigent une grande précision. Mais on ne peut obtenir ainsi que de faibles grossissements, et pour observer de très-petits objets on a recours au *microscope composé*, ainsi nommé parce qu'il est formé de la réunion de plusieurs lentilles.

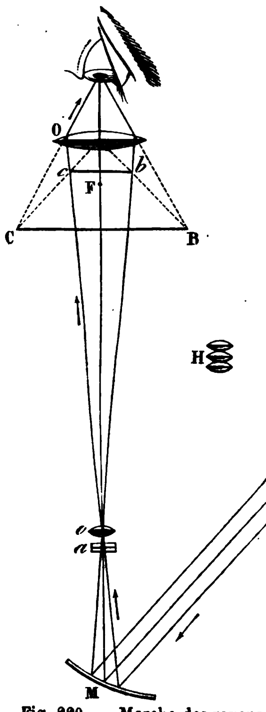


Fig. 220. — Marche des rayons dans le microscope composé.

La figure 219 représente un microscope composé au moment de l'observation, et la figure 220 fait voir la marche des rayons lumineux dans l'intérieur de l'appareil; dans les deux figures, les mêmes lettres correspondent aux mêmes pièces. Cela posé, l'objet qu'on observe, lequel est toujours très-petit, est placé en *a*, entre deux lames de verre, sur un support qu'on nomme *porte-objet*. Au-dessus est un tube de cuivre OA*o* dans lequel sont disposés deux lentilles convergentes : l'objectif *o* à la partie inférieure, et l'oculaire O à l'extrémité supérieure. L'objet *a* étant placé très-peu au delà du foyer principal de l'oculaire, on sait que ce verre en donne en *bc* une image réelle, renversée et déjà amplifiée (288, fig. 196); puis l'oculaire O étant à une distance telle que l'image *bc* se trouve entre ce verre et son foyer principal F, il en résulte, pour l'œil qui regarde au travers, que l'oculaire agit comme loupe (289), et donne en BC une image virtuelle et amplifiée de la première image *bc*.

Le grossissement dépend surtout de l'objectif. On augmente son pouvoir amplifiant en le composant de deux ou trois petites lentilles superposées, comme on le voit en H sur la droite du dessin (fig. 220). On ajoute aussi à l'oculaire un deuxième verre, mais qui a moins pour objet de grossir davantage que de rendre les images plus nettes, en atténuant, comme dans les lunettes, les aberrations de sphéricite et de réfrangibilité; de plus, tous les verres sont achromatiques (302). Le grossissement, dans les microscopes composés, a été porté jusqu'à 1800 fois et même au delà, mais on perd alors en netteté ce que l'on gagne en pouvoir amplifiant. Un bon grossissement ne dépasse pas 600 fois en longueur et en largeur, ce qui revient à 360 mille fois en surface.

Vu le grossissement considérable que reçoit l'image, il est indispensable que l'objet soit très-fortement éclairé. Pour cela, lorsqu'il est suffisamment transparent, on l'éclaire en dessous à l'aide d'un miroir concave M qui concentre sur lui une grande quantité de lumière, comme le fait voir la figure 220. Si l'objet est opaque, on l'éclaire en dessus avec une lentille convergente L qui va former son foyer sur l'objet même (fig. 219).

312. **Origine et usage du microscope.** — L'invention du microscope ne remonte qu'au commencement du XVIIe siècle, ce dont on a lieu de s'étonner, car on savait depuis longtemps qu'une goutte d'eau, versée sur un petit trou pratiqué dans une plaque mince et opaque, grossissait les petits objets vus au travers. Dès le commencement du Ier siècle de l'ère chrétienne, le philosophe Sénèque annonçait que l'écriture paraît plus grosse sous une boule de verre pleine d'eau. Enfin, dans le XIIIe siècle on faisait usage de *besicles*, c'est-à-dire de verres grossissants, pour faciliter la vision aux vieillards. On ne cite point le nom de l'inventeur du microscope, ce qui tient probablement à ce qu'il a subi successivement de nombreuses modifications. Ce n'est que depuis une trentaine d'années que M. Amici, en Italie, et M. Ch. Chevalier, en France, l'ont porté au degré de perfection qu'il a aujourd'hui.

Le microscope a été l'origine de découvertes aussi curieuses que variées dans le règne végétal et dans le règne animal. Les botanistes lui doivent leurs plus belles découvertes sur la structure du tissu cellulaire des plantes, la circulation de la séve, la fonction

des feuilles dans la respiration des végétaux. En entomologie, il a permis de découvrir et d'étudier une foule d'animaux qui nous seraient restés éternellement inconnus par leur extrême petitesse. C'est ainsi qu'on a observé, dans le vinaigre et dans la pâte aigrie, des milliers de petites anguilles nommées *vibrions;* dans les eaux stagnantes, des myriades d'animalcules, aussi remarquables par leurs formes bizarres que par leurs belles couleurs, leurs instincts, leurs mœurs guerrières ou sociables; les moisissures se sont transformées en petits champignons aux plus éclatantes couleurs. En un mot, tout objet vu au microscope devient un sujet d'étonnement et d'admiration : par exemple, un cheveu, un fil de soie, un œil ou une aile de mouche, un aiguillon d'abeille, un ongle d'araignée, un poil de chat ou de souris, le duvet des fruits, les écailles des ailes de papillon et de poisson, les fécules, les toiles d'araignée, la dentelle, etc. : partout on reconnaît la perfection infinie des ouvrages de la nature.

Ajoutons encore que le microscope peut être employé avec succès dans l'industrie pour reconnaître les mélanges frauduleux introduits par certains fabricants dans les étoffes, en donnant le moyen de constater si celles-ci contiennent de la laine, de la soie, du lin ou du coton.

CHAPITRE VIII.

RÉCRÉATIONS D'OPTIQUE.

313. **Lanterne magique.** — Tout le monde connaît la *lanterne magique*, le premier appareil de physique qu'on place entre les mains des enfants, mais en cherchant plutôt à les étonner qu'à les instruire. Cet appareil, inventé il y a 200 ans par le père Kircher, jésuite allemand, sert à obtenir sur un écran blanc, dans une chambre obscure, des images très-amplifiées de petits personnages ou autres sujets peints sur verre (fig. 221). Il se compose d'une boîte de fer-blanc représentée en coupe dans la figure 222. Dans cette boîte est une lampe placée devant un réflecteur M qui renvoie

la lumière sur une forte lentille L; celle-ci la fait ensuite converger vers une lame de verre *ab* sur laquelle sont peints les sujets qu'on veut représenter. Enfin, un système de deux lentilles *m*, agissant comme une seule très-grossissante, est placé à une distance telle

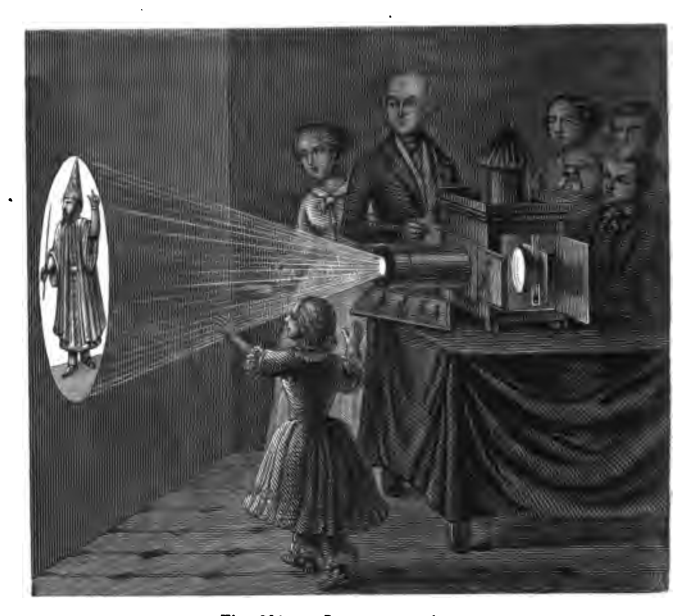


Fig. 221. — Lanterne magique.

que la lame de verre *ab* soit très-peu au delà du foyer principal. A cette distance, le système des deux lentilles se comporte comme dans l'expérience déjà représentée dans la figure 196 (page 343); c'est-à-dire qu'il reproduit, en AB, une image renversée et très-amplifiée des figures peintes sur le verre *ab*. On redresse l'image en plaçant dans la lanterne le verre peint de manière que le dessin soit renversé. Enfin, l'image AB va se former d'autant plus loin, et se trouve d'autant plus amplifiée que le verre *a* est plus rapproché du foyer principal du système lenticulaire *m*, et que ce système est plus grossissant.

314. **Fantasmagorie.** — La *fantasmagorie*, qui est une modifi-

cation de la lanterne magique, ne date que de la fin du XVIIIe siècle : son nom lui vient de deux mots grecs qui signifient ***assemblée de fantômes***, parce qu'on l'a d'abord appliquée à exciter la frayeur en faisant apparaître des spectres dans l'obscurité.

La disposition intérieure de la fantasmagorie est absolument la même que celle de la lanterne magique. La seule différence essentielle entre ces deux appareils, c'est que dans la lanterne magique

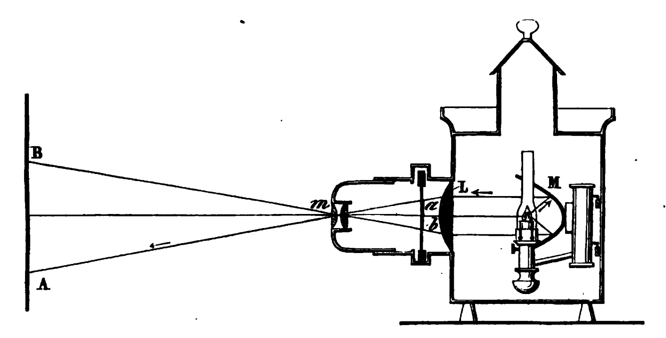


Fig. 222. — Coupe de la lanterne magique.

l'image projetée sur l'écran conserve toujours la même grandeur, tandis que dans la fantasmagorie on fait varier cette grandeur à volonté. Pour comprendre comment on obtient ce résultat, reportons-nous à la figure 222, qui représente la disposition des verres dans la lanterne magique. Là, les lentilles *m*, qui servent à projeter l'image sur l'écran, étant toujours également éloignées du verre peint *ab*, l'image AB se forme constamment à la même distance, et, par conséquent, conserve une grandeur fixe. Or, si l'on conçoit que les lentilles *m* se rapprochent du verre *ab*, il découle des propriétés des lentilles (288) que l'image ira se faire plus loin et sera plus grande. On voit donc que l'effet cherché nécessite deux mouvements : l'un qui rapproche le système de lentilles *m* du verre peint pour amplifier l'image; l'autre qui, en même temps, fasse reculer tout l'appareil, afin que l'image, tout en s'éloignant, aille toujours se former sur le même écran qui la recevait d'abord.

Pour obtenir ce double effet, la boîte qui renferme les verres

lenticulaires et la lampe est montée sur quatre roulettes de bois, recouvertes de drap pour rouler sans bruit sur le parquet. La figure 223 représente une fantasmagorie ainsi disposée; seulement, dans le dessin, elle est double, c'est-à-dire composée de deux appareils réunis. Nous verrons bientôt (315) pourquoi ce double emploi; pour le moment, ne considérons qu'un seul appareil, celui qui est sur le premier plan du dessin. La partie antérieure de la boîte est pourvue d'un tube conique en cuivre; c'est dans ce tube qu'est la lentille projetante, laquelle n'est pas fixe, mais peut avancer ou reculer à l'aide d'un bouton à crémaillère que l'expérimentateur fait tourner avec la main.

Cela posé, une grande toile en calicot blanc est tendue en avant de l'appareil, et les spectateurs sont placés de l'autre côté de cette toile. Le tout étant dans une obscurité profonde, celui qui fait marcher la fantasmagorie a soin de tenir d'abord la lentille projetante éloignée du verre sur lequel sont peints les objets qu'on veut montrer. De la sorte, il commence par se former de ces objets, sur la toile, une image très-petite; puis, d'une main, l'expérimentateur rapprochant la lentille du verre peint, tandis que de l'autre il tire à lui la fantasmagorie et l'écarte de la toile, l'image projetée sur celle-ci croît progressivement et finit par prendre des proportions considérables. Or, les spectateurs que l'obscurité empêche de distinguer si le lieu de l'image change ou ne change pas, et qui aperçoivent très-bien l'image au travers de la toile, se laissent séduire par l'illusion qui les porte à croire qu'elle s'approche d'eux en même temps que ses dimensions augmentent; en sorte que leur imagination trompée prend cet accroissement pour l'effet du mouvement progressif d'un spectre qui, éloigné d'abord, avance jusque sur eux. Quelques auteurs croient que l'on a fait usage de la fantasmagorie dans une haute antiquité, et que c'est à l'aide d'appareils du même genre qu'on effrayait ceux qu'on initiait aux mystères d'Isis et de Cérès, et qu'on faisait apparaître les divinités infernales ou les morts que l'on invoquait; toutefois, rien n'indique que les verres lenticulaires fussent alors connus, mais des miroirs concaves suffiraient pour produire des effets analogues à ceux de la fantasmagorie.

315. **Polyorama et dissolving views.** — Le *polyorama* et les *dissolving views*, que chacun a admirés chez l'habile prestidigi-



ig. 223. — Fantasmagorie.

tateur Robert Houdin, sont une application de la fantasmagorie. Celle-ci est alors double, comme le représente la figure 223, et les deux systèmes de lentilles vont converger vers un même point de la toile qui reçoit l'image. Cela posé, on a deux tableaux peints sur verre, représentant la même vue dans des conditions opposées ; par exemple, l'un, le mont Vésuve vu de jour, calme et surmonté seulement d'une légère colonne de fumée; l'autre, le même volcan vu de nuit, vomissant des flammes et des torrents de lave embrasée. Ayant placé ces verres, chacun dans une des fantasmagories, et les lentilles étant disposées de manière à projeter exactement sur la même partie de la toile les images amplifiées, on ouvre d'abord le diaphragme de la fantasmagorie dans laquelle est l'effet de jour, l'autre restant fermée; puis, quand l'image est restée exposée un certain temps aux yeux du spectateur, on fait marcher un mécanisme *a*, fermant doucement le diaphragme de la fantasmagorie qui vient de fonctionner, tout en ouvrant lentement l'autre; il en résulte qu'en passant successivement par toutes les gradations de lumière, l'image qui donne l'effet de jour disparaît, tandis qu'on voit lui succéder par nuances insensibles l'effet de nuit représenté sur l'autre tableau. On fait de même succéder à un effet de soleil couchant, un effet de lune; à une mer calme et transparente, la tempête; à un riant paysage, un effet de neige; et ainsi de suite avec une extrême variété. Tel est le ***polyorama***, ainsi nommé de deux mots grecs qui signifient ***plusieurs vues***.

Les ***dissolving views***, qui exigent aussi l'emploi d'une double fantasmagorie, ne diffèrent du polyorama qu'en ce que les deux tableaux peints sur verre représentant des sujets tout à fait opposés, à une vue on en fait succéder une autre qui en diffère essentiellement; par exemple une forêt abrupte à un riche palais, un désert aride à une ville populeuse, et cela par dégradation de teintes insensibles, une des images s'affaiblissant graduellement, tandis qu'une autre lui succède en se confondant d'abord avec elle d'une manière vague; de là des effets bizarres et imprévus, aussi attrayants par leur variété que par la cause mystérieuse qui les produit.

316. **Microscope photo-électrique.** — Le microscope photo-électrique est un appareil fondé entièrement sur les mêmes principes que la lanterne magique et la fantasmagorie. Seulement, dans

celles-ci, les sujets peints sur verre ayant déjà de notables dimensions, on n'a besoin que d'un grossissement peu considérable, et, par suite, que d'un éclairage peu intense; tandis que les objets dont le microscope photo-électrique reproduit l'image étant très-petits

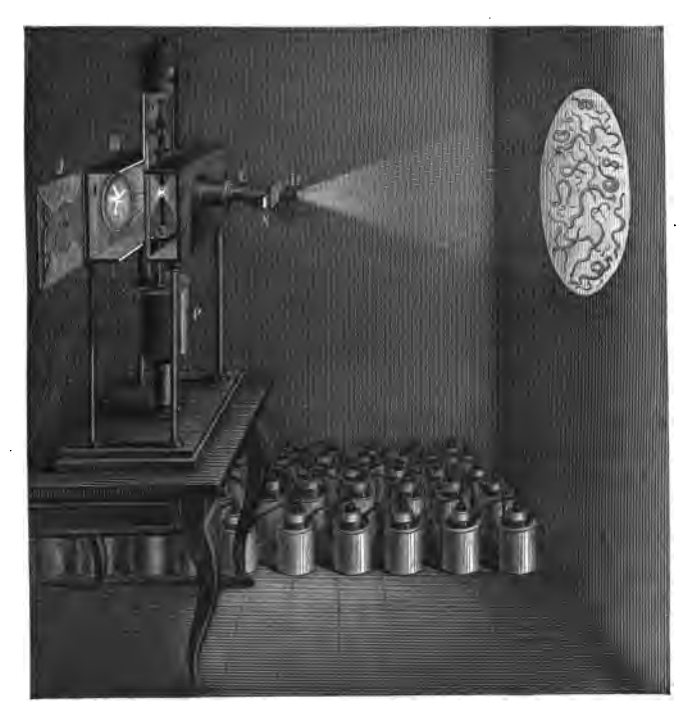


Fig. 224. — Microscope photo-électrique.

et devant être considérablement amplifiés, il est nécessaire de faire usage d'un éclairage très-puissant, sinon l'image serait obscure. C'est pour cela qu'on éclaire l'appareil à l'aide de la lumière éclatante que fournit l'électricité.

La figure 224 représente le microscope photo-électrique au moment de l'expérience. Au pied de l'appareil, on voit une série de bocaux qui servent au dégagement de l'électricité et que nous

décrirons bientôt sous le nom de *pile électrique*. De ces bocaux l'électricité se rend par deux fils de cuivre dans deux baguettes de charbon renfermées dans une boîte de laiton B. Ainsi traversés par l'électricité, ces charbons s'échauffent au point de devenir incandescents et de répandre un si vif éclat que l'œil ne peut le supporter. Un réflecteur I renvoie les rayons lumineux dans la direction du tube C, où ils rencontrent deux verres convergents qui les concentrent sur l'objet très-petit qu'on veut amplifier, lequel est disposé entre deux lames de verre X. De là, les rayons passent dans un tube D où se trouve un système de lentilles convergentes destinées à produire le même effet de projection que les lentilles *m* dans la lanterne magique (fig. 222); c'est-à-dire que c'est ce système de lentilles qui va produire au loin, sur un écran blanc, l'image extrêmement amplifiée du petit objet placé entre les lames de verre. Le tube D est mobile et peut s'approcher plus ou moins de l'objet, de manière à faire varier le grossissement.

Dans le dessin ci-dessus, l'image projetée sur l'écran est celle des infusoires qu'on trouve dans la colle de pâte quand elle a fermenté. On en prend une petite quantité qu'on délaie dans l'eau, et on en met quelques gouttes dans une petite boîte de verre à faces parallèles qu'on place en X. On voit alors sur l'écran une multitude de ces animalcules, ayant jusqu'à 30 et 40 centimètres de longueur, s'agiter avec une grande confusion et mourir promptement, tués par la chaleur qui se concentre en même temps que la lumière au foyer des lentilles éclairantes.

L'expérience du microscope photo-électrique est une des plus curieuses et des plus agréables de la physique. Avec cet instrument on peut montrer à la fois à un grand nombre de spectateurs, et avec un grossissement considérable, des objets prodigieusement petits. Un cheveu, par exemple, paraît gros comme un manche de balai; une puce, comme un mouton; l'acarus de la gale, animalcule qui se trouve dans les pustules des galeux, et est la cause de la contagion de la maladie, paraît plus gros que la tête d'un homme; il en est de même des animalcules qui se trouvent sur la croûte des fromages secs, quoique tous ces petits animaux ne puissent se distinguer à l'œil nu. Une des expériences les plus remarquables est celle de la circulation du sang; on la fait en pla-

çant entre les deux lames de verre la queue d'un têtard vivant, c'est-à-dire d'un petit de grenouille, quand ses membres inférieurs et supérieurs ne sont pas encore développés. On aperçoit alors, sur l'écran, comme une carte de géographie enluminée, dont toutes les rivières paraissent animées d'un écoulement très-rapide; c'est le sang qui circule avec une grande vitesse dans les artères et dans les veines. Une expérience très-belle est encore celle de la cristallisation des sels, et surtout du sel ammoniac. On fait dissoudre ce sel dans de l'eau, et l'on étale une goutte de cette dissolution sur une lame de verre qu'on place dans l'appareil. La chaleur faisant évaporer l'eau, il se forme une végétation surprenante par la promptitude avec laquelle les molécules cristallines se groupent entre elles pour produire de magnifiques ramifications en forme de feuilles de fougère.

On éclaire quelquefois l'appareil que nous venons de décrire au moyen de la lumière du soleil, et on lui donne alors le nom de *microscope solaire*. On l'a éclairé pendant un temps avec la lumière très-vive qu'on obtient en brûlant un mélange d'hydrogène et d'oxygène sur de la craie, et il était alors connu sous le nom de *microscope à gaz*.

317. **Diorama.** — On a donné le nom de *diorama*, de deux mots grecs qui signifient *vu à travers*, à des tableaux peints à la fois des deux côtés sur une toile transparente, en percale ou en calicot, de manière à représenter deux effets opposés, à la façon du polyorama, suivant que ces tableaux sont vus par réflexion ou par transmission.

Le tableau est disposé verticalement dans une chambre obscure, comme le représente la figure 225. Le premier effet, celui qui est peint sur le devant de la toile, est éclairé par réflexion; le second, celui qui est peint derrière, est éclairé par transmission. Pour cela, une croisée M placée à l'étage supérieur, envoie la lumière sur un écran E qui la réfléchit vers le tableau et l'éclaire par devant. Derrière la toile est une seconde croisée N qui sert à l'éclairer par derrière quand elle est ouverte. Cela posé, les volets NN étant fermés, les spectateurs voient d'abord le sujet peint sur le devant de la toile; puis un manœuvre faisant avancer lentement un écran A, qui glisse sans bruit sur deux coulisses, la lumière diminue peu à

peu, et quand le tableau n'est presque plus éclairé, on ouvre par degrés les volets NN; c'est alors que le tableau peint de l'autre côté de la toile apparaît au travers et se substitue au premier.



Fig. 225. — Diorama de Daguerre.

C'est à Daguerre, le célèbre inventeur du daguerréotype, qu'est dû le diorama. Il avait acquis une grande habileté dans ce genre de peinture, et ses tableaux ont longtemps attiré la foule, notam-

ment sa ***Messe de minuit***, dans laquelle on voyait apparaître de nombreux fidèles là où un instant auparavant il n'y avait que des chaises vides; et sa ***Vallée de Goldeau***, où des rochers éboulés remplaçaient l'aspect d'une riante vallée. Le dessin ci-contre représente cette vallée avant l'éboulement. Au moment où la lumière était interceptée par l'écran, les éclairs brillaient, la foudre grondait, tout simulait un violent orage; puis, quand le jour revenait, les rochers étaient éboulés, le lac en partie comblé, le chalet dé-

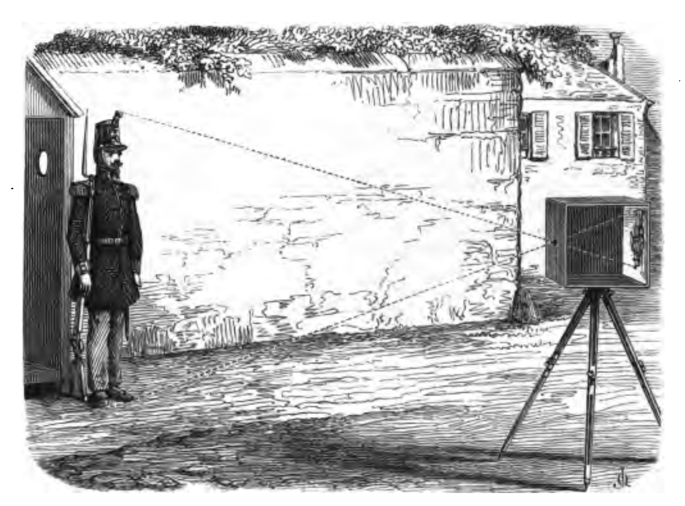


Fig. 226. — Image renversée dans la chambre noire.

truit; en un mot, on avait sous les yeux, avec une étonnante vérité, l'image de la ruine et de la désolation. L'illusion des tableaux de Daguerre était si complète qu'on rapporte qu'un habitant de la campagne des environs de Paris, qui visitait le diorama de l'***Église Saint-Germain-l'Auxerrois***, ressentit une telle surprise, qu'il tira un sou de sa poche et le lança sur la peinture, pour s'assurer si vraiment c'était une toile ou l'espace qui était devant ses yeux.

318. **Chambre noire.** — Un physicien napolitain, Jean-Baptiste Porta, observa, le premier, vers 1680, que si l'on perce un très-petit trou dans le volet d'une ***chambre noire***, c'est-à-dire com-

plétement privée de lumière, tous les objets extérieurs dont les rayons peuvent atteindre le trou, vont se peindre sur un écran opposé avec des dimensions d'autant plus petites que cet écran est plus rapproché de l'ouverture. Le même physicien découvrit bientôt après que le trou de la chambre noire peut avoir une grandeur quelconque, lorsqu'on y applique une lentille convergente qui le

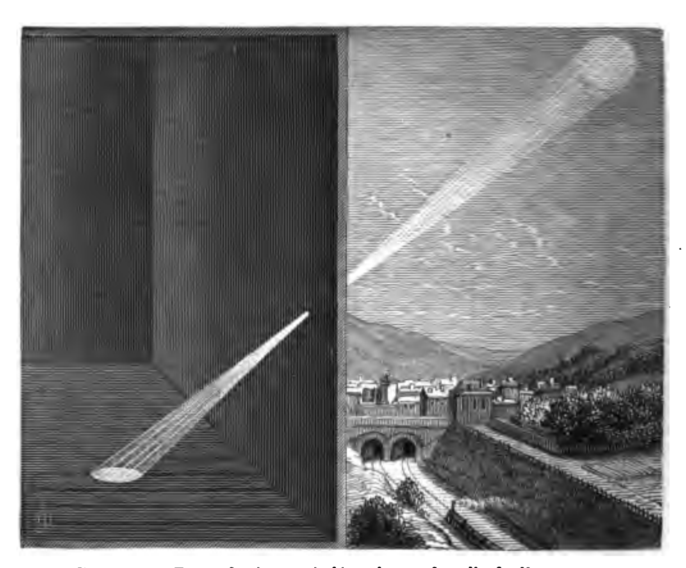


Fig. 227. — Forme des images indépendantes de celle de l'ouverture.

remplit exactement et fait concourir les rayons sur l'écran. Les images gagnent beaucoup alors en netteté et en éclat; mais, dans les deux cas, elles sont renversées.

La figure 226 montre comment les images de la chambre noire se forment renversées sur l'écran. On voit que ce renversement est dû au croisement même des rayons dans la petite ouverture. Il en résulte, en effet, que les rayons partis des points les plus élevés de l'objet, continuant à se propager en ligne droite, vont rencontrer l'écran à sa partie inférieure, tandis que c'est l'inverse qui a lieu pour les rayons partis des points les plus bas. Quant à

la coloration de l'image, elle s'explique sans peine en observant que les rayons réfléchis sont de même couleur que le corps réfléchissant; c'est-à-dire qu'un corps rouge réfléchit des rayons rouges, un corps jaune des rayons jaunes, et que, par suite, chaque portion de l'image est formée par le concours de rayons de même couleur que la partie correspondante de l'objet qu'elle représente.

Les images de la chambre noire offrent encore une particula-



Fig. 228. — Images du soleil au travers du feuillage.

rité remarquable, c'est d'être indépendantes de la forme de l'ouverture par laquelle entrent les rayons, ***pourvu que celle-ci soit très-petite;*** c'est-à-dire que cette ouverture soit ronde, carrée ou triangulaire, l'image qui se peint sur l'écran est toujours la reproduction fidèle des objets extérieurs et non du trou pratiqué dans le volet. Pour nous rendre compte de ce phénomène, considérons un faisceau de lumière solaire pénétrant dans l'intérieur d'une chambre obscure par un petit trou de forme quelconque (fig. 227). Vu la grandeur du soleil, ce petit trou n'est en réalité qu'un point; d'où il résulte que l'ensemble des rayons qui le traversent repré-

sente un immense cône lumineux dont le trou de la chambre noire est le sommet et dont le soleil est la base. Or, par leur prolongement en ligne droite dans l'intérieur de la chambre, ces rayons donnent naissance à un second cône semblable au premier, mais



Fig. 229. — Formation des images dans la chambre noire.

beaucoup plus petit; et si ce second cône tombe sur un écran perpendiculaire à la droite qui joint son sommet au centre du soleil, il forme sur cet écran une image circulaire comme le soleil. Si l'écran est oblique par rapport à cette ligne, comme le représente la figure 277, l'image est oblongue, mais jamais elle ne présente la forme de l'ouverture, à moins que l'écran n'en soit très-rapproché.

C'est de la même manière qu'il faut expliquer les cercles lumineux qu'on voit se former sur la terre, sous une avenue de grands arbres éclairés par le soleil : quelle que soit la forme des intervalles par lesquels passe la lumière à travers le feuillage, c'est toujours l'image circulaire du soleil qui vient se projeter sur le sol (fig. 228).

319. **Redressement des images dans la chambre noire.** — Lors-



Fig. 230. — Chambre noire portative pour dessin.

qu'on veut reproduire, dans la chambre noire, un monument, une vue, un paysage, il importe de redresser l'image. Pour cela, on dispose l'appareil comme le montre la figure 229. Un peu au-dessus du trou par lequel entrent les rayons, on adapte un miroir plan, incliné de manière à les renvoyer sur une lentille convergente fixée à l'extrémité d'un tube. Au-dessous de cette lentille, à la distance de son foyer, est un écran blanc sur lequel viennent se peindre les objets extérieurs. Les images ainsi obtenues, redressées par l'effet de la réflexion sur le miroir plan, ne sont pas seulement admirables de vérité et de coloris, mais, ce qu'aucun autre

genre de reproduction ne saurait faire, elles reproduisent les mouvements. En effet, si la chambre noire est établie devant une promenade, une place publique, on voit l'image des passants traverser l'écran, et cela avec une telle fidélité qu'on peut les reconnaître.

La chambre noire fournit ainsi un spectacle amusant; de plus, elle peut être avantageusement utilisée dans l'art du dessin, car même une personne qui ne sait pas dessiner peut suivre avec un crayon les contours de l'image et la fixer sur l'écran. Toutefois, lorsqu'on veut appliquer la chambre noire au dessin, on lui donne ordinairement la disposition ci-après.

320. **Chambre noire portative.** — Lorsqu'on veut prendre des vues avec la chambre noire, il est nécessaire qu'elle soit portative, et

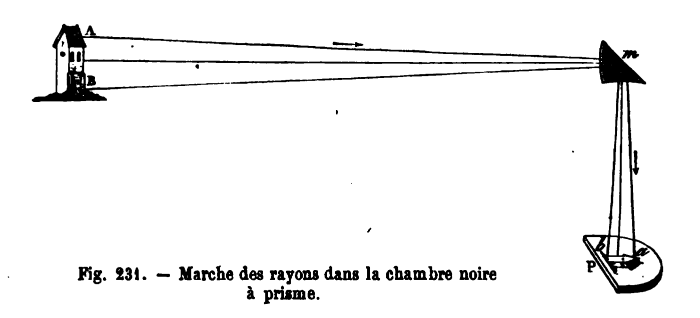


Fig. 231. — Marche des rayons dans la chambre noire à prisme.

pour cela elle doit être légère et d'un petit volume. Pour obtenir ce double résultat, on a construit différentes sortes de chambres noires; la plus simple et la plus commode est celles de M. Charles Chevalier, représentée dans la figure 230. Elle se compose de trois pieds de bois portant à leur partie supérieure un disque de même matière; celui-ci est entouré d'un rideau noir qui forme une petite tente sous laquelle se place le dessinateur. Au centre de la tente est une planchette portée par les trois pieds, sur laquelle se projette l'image qu'on veut dessiner. Cette planchette se démonte, les pieds sont à charnière en leur milieu, en sorte que tout cela se ploie sous un très-petit volume. Enfin, au haut de l'appareil, dans un tube de cuivre ouvert latéralement, est un prisme de

verre qui produit identiquement l'effet du miroir incliné et de la lentille dans la chambre noire décrite ci-dessus (fig. 229). Pour cela, la première face du prisme est convexe, comme le représente la figure 231. Il en résulte qu'en entrant dans ce prisme les rayons deviennent convergents ; puis subissant, sur la grande face *m*, la réflexion totale (277), ils sont renvoyés vers la troisième, d'où ils sortent, enfin, avec la même convergence que s'ils avaient traversé une lentille; c'est ce qui fait qu'ils vont reproduire en *ab*, sur la planchette, l'image de l'objet AB d'où ils sont partis. C'est ensuite cette image dont le dessinateur prend les contours sur une feuille de papier (fig. 230).

DAGUERRÉOTYPE.

321. **Historique de l'invention du daguerréotype.** — Le *daguerréotype* est une petite chambre noire, dans laquelle on fixe les images sur des plaques métalliques au moyen de l'action qu'exerce la lumière sur certaines substances chimiques. C'est-à-dire que c'est le soleil qui devient ici dessinateur; de là le nom d'*héliographie* (dessin par le soleil) qu'on donna d'abord à ce nouvel art; mais, quoique peu harmonieux, le mot de *daguerréotypie* a prévalu, du nom de l'inventeur, ou plutôt de l'un des inventeurs, car deux noms sont intimement liés à cette grande découverte : ceux de Nicéphore Niepce et de Daguerre.

A ce sujet, M. Francis Wey a publié dans le *Musée des familles*, n[os] de juin et de juillet 1853, deux articles pleins d'intérêt. Il y fait avec impartialité l'historique de l'invention du daguerréotype, et raconte avec charme comment Niepce, à Châtillon-sur-Saône, et Daguerre, à Paris, cherchaient chacun de leur côté à fixer les images de la chambre noire, lorsque M. Charles Chevalier, leur confident à tous les deux depuis plusieurs années, apprit à Daguerre qu'un provincial, un amateur retiré à la campagne, s'occupait des mêmes recherches que lui. Cette communication inquiéta Daguerre, qui écrivit à Niepce, lui disant que depuis longtemps lui aussi cherchait l'impossible. Ce dernier ne répondit qu'avec défiance; cependant, dès lors s'établit entre eux une correspondance de laquelle il résulte qu'au commencement de 1827 Daguerre n'avait

encore rien trouvé, tandis qu'à cette époque Niepce parvenait déjà à reproduire sur des écrans convenablement préparés des points de vue pris d'après nature; seulement, il lui fallait pour cela un temps considérable, dix à douze heures. Enfin, en 1829, les deux inventeurs s'associèrent et firent un traité pour exploiter en commun leur découverte. Mais Niepce mourut quatre ans après, pauvre et ignoré, laissant son œuvre inachevée.

Daguerre, demeuré seul possesseur des procédés de son associé, continua ses recherches dans un profond secret encore pendant cinq années. Il paraît qu'il craignait d'être devancé; en effet, M. Francis Wey, d'après M. Charles Chevalier, rapporte une curieuse anecdote. Vers cette époque, un inconnu, jeune encore, à l'extérieur pauvre et maladif, se présenta un jour à la boutique d'opticien de M. Charles Chevalier, située alors quai de l'Horloge; là, après avoir marchandé quelque objet nécessaire à ses recherches, il dit qu'il travaillait à fixer les images de la chambre noire et que déjà il pourrait obtenir des résultats dignes d'attention s'il avait de meilleurs instruments. A l'appui de ces paroles, il tira de sa poche une image distincte, sur papier, laquelle représentait des toits et des cheminées, et dans le lointain le dôme des Invalides, ce qui prouve que le pauvre inventeur habitait quelque mansarde. Il montra aussi une petite fiole contenant une liqueur brune avec laquelle, dit-il, il opérait. Cet inconnu, mort sans doute de misère, ne reparut pas, ne laissant pas même un nom de plus à inscrire sur le martyrologe des inventeurs. Il avait oublié sur le comptoir sa petite fiole; quelques mois après, M. Charles Chevalier la remit à Daguerre, qui essaya le liquide, mais sans succès. A la même époque, un Anglais, M. Talbot, cherchait lui aussi et trouvait la fixation des images, comme nous le verrons ci-après. La grande découverte semblait donc prête à surgir de plusieurs points, elle était dans l'air, lorsque Daguerre, en 1839, annonça qu'il était parvenu à fixer, en quelques minutes, les images de la chambre noire sur des plaques métalliques. Dans la même année, il rendit publics ses procédés, moyennant une rente viagère dont il porta lui-même le chiffre à 4000 francs pour lui et autant pour le fils de Niepce; mais la part du premier fut portée à 6000 francs, parce qu'il faisait connaître en même temps ses procédés de peinture pour le

diorama. C'était bien peu pour une découverte qui illustrait la France, et qui depuis lors a fait gagner des millions aux fabricants de Paris !

322. **Procédé de Daguerre.** — Le procédé de Daguerre consiste à recevoir les images de la chambre noire sur des plaques de cuivre argentées et polies, préalablement recouvertes d'une *couche sensible,* c'est-à-dire d'une substance qui les rende propres à recevoir l'action de la lumière. Cette substante est l'*iode,* corps simple qu'on extrait des plantes marines, et qui, quoique solide, répand constamment des vapeurs, même aux températures ordinaires. En exposant la plaque argentée à ces vapeurs, pendant deux minutes environ, l'iode s'unit à l'argent sous une couche extrêmement mince, en formant un composé connu en chimie sous le nom d'*iodure d'argent.* C'est alors que la plaque est impressionnable à la lumière, et que, placée dans la chambre noire, au foyer d'un verre lenticulaire par lequel entrent les rayons lumineux, elle reçoit leur mystérieuse action. Si l'on regarde alors la plaque, on ne voit encore aucune trace d'image; pour que celle-ci devienne visible, il reste à exposer la plaque pendant quelques minutes à des vapeurs de mercure. En se déposant seulement sur les parties qui ont été éclairées, ces vapeurs forment un amalgame d'argent qui donne les blancs de l'épreuve, tandis que les autres parties restent noires.

Tel était le procédé de Daguerre; mais il présentait encore plusieurs imperfections : les plaques préparées comme ci-dessus exigeaient dix à douze minutes d'exposition à la lumière solaire, ce qui rendait l'opération tout à fait impropre à la reproduction des portraits; de plus, les images n'étaient point adhérentes aux plaques, et la moindre friction les détruisait; enfin, elles *miroitaient* d'une manière très-désagréable. Tous ces défauts ont été heureusement corrigés par un même héliographe, M. Fizeau. Cet habile praticien trouva d'abord que le *brome,* substance liquide qui a beaucoup de rapport avec l'iode, exaltait considérablement la sensibilité des plaques. En effet, lorsque celles-ci ont été soumises successivement aux vapeurs d'iode et de brome, on obtient des épreuves presque instantanées au soleil, et dans l'espace de 6 à 30 secondes à l'ombre. C'était là un immense perfectionnement; mais M. Fizeau parvint encore à fixer les images et à les empêcher

de miroiter, en versant sur l'épreuve une dissolution de chlorure d'or et d'hyposulfite de soude, et en chauffant légèrement. Dans cette opération, l'or, en se combinant à l'argent de la plaque et au mercure, rend celui-ci adhérent; en même temps les clairs de l'épreuve acquièrent un remarquable accroissement d'intensité. De-

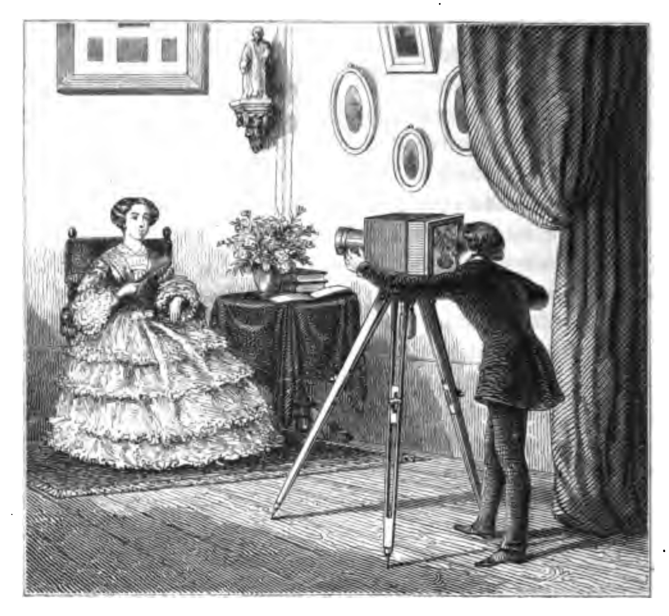


Fig. 232. — Daguerréotype.

puis, de nombreux praticiens ont successivement coopéré à l'amélioration des épreuves daguerriennes; aussi, entre des mains habiles, sont-elles arrivées aujourd'hui à une perfection presque idéale.

La figure 232 représente l'appareil qui constitue le daguerréotype. C'est une boîte rectangulaire de bois, faisant l'office de chambre noire. A la face antérieure est fixé un tube de cuivre dans lequel est un objectif convergent. Dans la face opposée, qui est à tirage de manière à être écartée plus ou moins de l'objectif, est un verre dépoli sur lequel vient se former l'image de la personne

dont on veut obtenir le portrait. On tire d'abord l'écran de verre jusqu'à ce que l'image apparaisse nettement dessus; puis on achève de mettre exactement au foyer en avançant ou reculant l'objectif à l'aide d'un petit bouton à crémaillère qu'on fait marcher avec la main. On enlève alors l'écran de verre, qui n'est pas fixé à la boîte, mais monté dans un châssis à coulisse, et on lui substitue la plaque argentée, après qu'elle a été iodée et bromée; et c'est lorsqu'elle a ainsi subi l'action de la lumière, qu'on la soumet aux vapeurs de mercure et qu'on verse ensuite dessus la dissolution de chlorure d'or et d'hyposulfite de soude destinée à fixer l'image et en même temps à faire valoir les clairs et les noirs de l'épreuve.

323. **Photographie sur papier.** — On désigne spécialement aujourd'hui sous le nom de *photographie* (dessin par la lumière), l'art de produire des épreuves daguerriennes sur papier. Dès 1834, M. Talbot, en Angleterre, était parvenu à fixer les images de la chambre noire sur papier; mais il ne publia son procédé qu'après l'apparition du daguerréotype. Incomplète ou mal appliquée, cette découverte tomba dans l'oubli jusqu'en 1847, où encore un provincial, M. Blancard-Evrard, fabricant de drap à Lille, publia sur le procédé Talbot perfectionné une brochure accompagnée d'épreuves sur papier très-remarquables, qui mirent enfin la photographie à la mode. Depuis, les principaux perfectionnements qu'elle a reçus sont surtout dus à M. Niepce de Saint-Victor, neveu de Nicéphore Niepce.

Ne pouvant décrire ici les différents procédés de la photographie, bornons-nous à dire qu'ils diffèrent essentiellement de celui de Daguerre. En effet, tandis que dans celui-ci on obtient l'image du premier coup, dans la photographie, on a d'abord une image dont les teintes sont renversées, c'est-à-dire que les parties claires sont noires, et réciproquement : c'est l'*image négative*. Puis, à l'aide de cette première image, on en obtient une seconde dont les teintes sont renversées de nouveau, et, par suite, se retrouvent dans leur ordre naturel : c'est l'*image positive*. Ces deux images s'obtiennent à l'aide de papiers imprégnés de sels d'argent, qui ont la propriété de noircir par l'action de la lumière (295).

L'avantage de la photographie est qu'une fois l'épreuve négative obtenue, elle peut servir indéfiniment à tirer autant d'épreuves

positives que l'on veut; résultat précieux pour les épreuves qui sont de nature à être tirées à un grand nombre, comme celles, par exemple, qu'on fabrique pour le stéréoscope.

CHAPITRE IX

VISION ET STÉRÉOSCOPE.

324. **Structure de l'œil et mécanisme de la vision.** — Quoique la description de l'œil appartienne plutôt à la physiologie qu'à la physique, il n'est pas sans intérêt de faire connaître ici la structure de cet organe, qui n'est pas seulement un véritable instrument d'optique, mais un instrument d'une perfection inimitable; car il ne présente ni aberration de sphéricité, ni aberration de réfrangibilité, et possède en outre la propriété remarquable de s'adapter immédiatement pour voir distinctement à toutes les distances, ce que ne font pas les autres instruments d'optique.

L'œil a la forme d'un globe à peu près sphérique, enveloppé par plusieurs membranes que la figure 233 représente ouvertes d'avant en arrière. La partie antérieure de l'œil est fermée par une membrane *c*, parfaitement diaphane, qui est la *cornée transparente*, et qu'on nomme communément le *blanc de l'œil*. A une petite distance derrière la cornée est une cloison membraneuse *hi* qu'on appelle *iris*, et qui n'est autre que le disque diversement coloré qui apparaît au milieu du blanc de l'œil. Au centre de l'iris est une ouverture nommée *pupille* ou *prunelle;* c'est par cette ouverture, qui est ronde chez l'homme, étroite et allongée chez le chat, que les rayons lumineux pénètrent dans l'œil. Après l'iris, vient le cristallin *o*, masse transparente, ayant tout à fait la forme d'une lentille biconvexe et en remplissant les fonctions. Toute la partie postérieure, depuis le cristallin jusqu'au fond de l'œil, est remplie d'une masse gélatineuse, diaphane, ressemblant à du blanc d'œuf, et qu'on nomme l'*humeur vitrée ;* en avant de l'œil, entre le cristallin et la cornée, est un autre liquide, limpide comme de l'eau, qu'on désigne sous le nom d'*humeur aqueuse*. Enfin, toute la partie postérieure et interne de l'œil est tapissée d'une membrane R,

molle, blanchâtre et transparente, c'est la ***rétine;*** elle n'est qu'un épanouissement d'un nerf N, qui se rend au cerveau et lui transmet la sensation de la vision; d'où lui vient le nom de ***nerf optique***. Extérieurement à la rétine est une seconde membrane C nommée *choroïde*, laquelle est imprégnée d'une matière noire destinée à

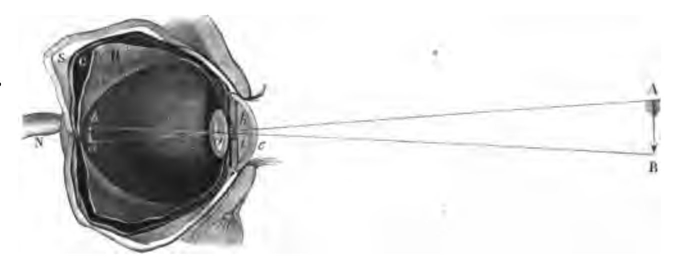


Fig. 233. — Formation des images sur la rétine.

absorber tous les rayons qui ne doivent pas concourir à la vision. Une dernière membrane S, la ***sclérotique***, enveloppe tout le globe de l'œil dans sa partie postérieure et va se réunir en avant à la cornée transparente.

Ces détails connus, il est facile de se rendre compte du mécanisme de la vision. On voit, en effet, que l'œil n'est autre chose qu'une véritable chambre noire en miniature : la pupille est l'ouverture du volet; le cristallin, la lentille qui sert à former l'image; et la rétine, l'écran sur lequel elle va se peindre renversée et très-petite. De là, c'est le nerf optique qui, portant au cerveau l'impression produite par les vibrations de l'éther sur le système nerveux de la rétine, nous donne la perception des objets extérieurs; et c'est du plus ou du moins grand nombre de ces vibrations que résulte la sensation spéciale à chaque couleur.

On a beaucoup écrit pour expliquer comment les images qui se forment sur la rétine étant renversées, nous voyons cependant les objets dans leur position naturelle. Ce qu'on a dit de plus probable, c'est que nous voyons les différents points d'un objet dans la direction même du rayon qui nous en transmet l'image, d'où il résulte que chaque point est rapporté, hors de nous, à la position qu'il occupe réellement; par exemple, dans la figure ci-dessus, le point A

est vu dans la direction aA, et le point B dans la direction bB, ce qui conserve aux points A et B leur position relative véritable.

325. **Distance de la vue distincte, vues myopes et vues presbytes.** — On sait que dans les lentilles biconvexes la distance des images à la lentille augmente ou diminue à mesure que les objets s'approchent ou s'éloignent (285); par suite, selon la distance des objets qu'on regarde, il semble que l'image formée par le cristallin devrait aller se former tantôt exactement sur la rétine, tantôt un peu en avant ou en arrière de cette membrane. On ne verrait donc distinctement que les objets placés à une certaine distance, tous ceux situés plus près ou plus loin paraîtraient confus. Or, c'est ce qui n'arrive pas pour un œil bien conformé, car il voit nettement à des distances très-variables, d'où l'on conclut que l'image se forme toujours exactement sur la rétine.

Toutefois, quoique l'œil distingue fort bien les objets à des distances différentes, cependant, pour chaque personne, il en est une à laquelle la vision s'opère plus nettement qu'à tout autre. Cette distance, qu'on appelle *distance de la vue distincte*, varie avec les individus, et souvent d'un œil à l'autre chez la même personne; pour les petits objets, comme le texte d'un livre, elle est, en général, de 30 centimètres. Ceux chez lesquels la distance de la vue distincte est moindre ont l'œil mal conformé, et on dit qu'ils sont *myopes*, de deux mots grecs qui signifient *fermer les yeux*, parce qu'en effet, pour voir plus distinctement, ces personnes sont obligées de cligner des yeux. Si la distance de la vue distincte est plus grande que 30 centimètres, cela encore indique un vice de conformation de l'œil, et ceux qui en sont affectés sont dits *presbytes*, d'un mot grec qui signifie *vieillard*, parce que ce défaut de la vue s'observe généralement chez les personnes âgées.

La *myopie* résulte d'une trop grande convexité de la cornée ou du cristallin. L'œil étant alors trop convergent, les rayons lumineux subissent une réfraction telle qu'au lieu d'aller former leur foyer exactement sur la rétine, ils le forment un peu en avant, et que, par suite, l'image que perçoit cette membrane est confuse. Mais si l'on rapproche les objets de l'œil, l'image s'éloigne (285) et va se former exactement sur la rétine quand les objets sont suffisamment proches; ce qui explique pourquoi les myopes ne voient que

de très-près. Ils arrivent encore à voir plus distinctement en contractant les paupières ou en regardant à travers un petit trou percé dans une carte, parce qu'alors le diamètre du faisceau lumineux qui pénètre dans l'œil étant très-diminué, les rayons ne traversent le cristallin que tout à fait en sa partie centrale, et, par suite, étant moins affectés de son excès de convexité, ils vont former leur foyer plus loin. La myopie se rencontre surtout chez les jeunes gens; à mesure qu'on vieillit, la convexité de l'œil décroît, en sorte que la vue des myopes s'améliore, en général, à l'âge où les autres vues s'affaiblissent.

Le *presbytisme*, qui est le contraire de la myopie, a pour cause l'aplatissement du cristallin. L'œil n'étant plus alors assez convergent, les rayons, au lieu d'aller former leur foyer sur la rétine, tendent à le former au delà, ce qui fait que la rétine ne perçoit encore qu'une image confuse. Mais si les objets qu'on regarde s'éloignent, l'image se rapproche du cristallin et vient se former exactement sur la rétine dès que ces objets sont assez éloignés, ce qui explique comment les presbytes ne peuvent voir que de loin.

On remédie à la myopie, en plaçant devant les yeux des lentilles divergentes; par l'effet de ces verres, le faisceau s'épanouissant davantage avant son entrée dans l'œil, le foyer du cristallin se trouve reculé jusqu'à la rétine, à condition toutefois que le degré de divergence des verres soit convenablement approprié à l'excès de convexité de l'œil. Pour les presbytes, au contraire, on doit faire usage de verres convergents, afin de corriger le manque de convexité de l'œil. Les rayons devenant ainsi plus convergents avant leur entrée dans l'œil, l'image qui tendait à aller se former au delà de la rétine s'en rapproche et vient se produire exactement sur cette membrane.

On a longtemps fait usage exclusivement de verres biconcaves pour les myopes, et de verres biconvexes pour les presbytes. Mais nous ne pouvons trop recommander aux personnes qui portent des lunettes de ne faire usage que des lentilles concaves-convexes représentées en O dans la figure 186, si elles sont presbytes; et de celles représentées en R (fig. 187), si elles sont myopes. Ces verres, dont l'usage a été importé d'Angleterre en France par M. Biot, sont connus sous le nom de *verres périscopiques*, de deux mots

grecs qui signifient *voir autour*, parce que leur forme même leur permettant de mieux embrasser le globe de l'œil, ils facilitent la vision dans toutes les directions, et, par suite, déforment moins les objets et fatiguent beaucoup moins la vue que les autres verres.

326. **Vision avec les deux yeux.** — Quoique nous ayons deux yeux, et que lorsque nous les fixons sur un même objet, il se forme sur chaque rétine une image, cependant nous ne voyons qu'un objet, de même qu'avec les deux oreilles nous n'entendons qu'un son. On a fait différentes hypothèses pour expliquer la vue simple avec les deux yeux. Les uns l'ont regardée comme un effet de l'habitude; d'autres, l'attribuant à une cause physiologique, ont émis l'opinion que deux points semblablement placés sur les deux rétines correspondent à un même filet nerveux qui, venant du cerveau, se bifurque vers chaque œil; d'où il résulte que des deux impressions simultanées qui se produisent sur les deux rétines naît finalement une sensation unique.

La vision simultanée avec les deux yeux n'a pas seulement pour effet de nous faire voir les corps avec plus d'éclat, mais de nous donner la perception nette de leur relief, ainsi que le démontre la charmante expérience du stéréoscope.

327. **Stéréoscope.** — Le *stéréoscope*, ainsi nommé de deux mots grecs qui signifient *voir solide*, *voir avec les trois dimensions*, est un ingénieux appareil imaginé, à Londres, par M. Wheatstone, en 1838, et modifié tel qu'il est aujourd'hui par M. Brewster. Ce dernier l'importa en France en 1850, où il fut bientôt popularisé par M. Duboscq et par l'abbé Moigno; le premier en ayant construit un grand nombre, et le second en ayant donné la description et la théorie dans une petite brochure.

Pour se rendre compte de l'effet du stéréoscope, il importe d'observer que lorsque nous regardons un objet avec les deux yeux, chaque œil ne le voit pas rigoureusement sous le même aspect, mais avec une perspective un peu différente. Par exemple, soit un petit cube, comme un dé à jouer, placé à une faible distance, et regardé successivement avec un seul œil, la tête restant immobile. Si le cube tourne directement une face vers l'observateur, celui-ci regardant avec l'œil gauche voit cette face et un peu aussi la face latérale gauche, l'autre restant cachée; au contraire, s'il regarde

de l'œil droit, il voit encore la face antérieure, mais actuellement c'est la face droite qui apparaît et la gauche qui est cachée. On constate donc ainsi que les images qui se forment sur les deux rétines ne sont point identiques; cela provient de ce que chacune correspond à un point de vue différent. Or, c'est cette différence d'images qui nous donne la sensation du relief des corps solides, et nous met à même d'apprécier leur forme et leur distance.

Cela posé, qu'on trace sur une feuille de papier, à quelques centimètres l'un de l'autre, deux dessins d'un même objet, respectivement avec la perspective appartenant à l'œil droit et à l'œil gauche; puis que chaque œil regarde séparément le dessin qui lui correspond au travers de prismes ou de lentilles qui fassent coïncider les deux dessins, en donnant aux rayons lumineux la même direction que s'ils partaient d'un objet unique; il est évident que l'impression produite sur chaque rétine sera alors identiquement la même que si l'on avait l'objet devant les yeux. En effet, l'illusion est si complète que quelque prévenu que l'on soit, il est impossible de ne pas y être trompé, tant sont vrais les effets de relief et de perspective.

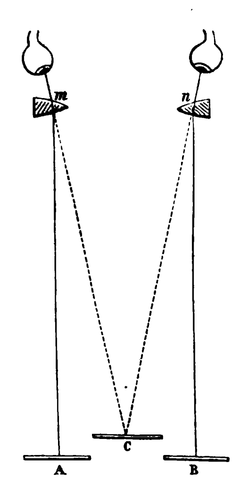


Fig. 234. — Marche des rayons dans le stéréoscope.

Tel est le principe du stéréoscope. La figure 234 fait voir la marche des rayons lumineux dans cet instrument. En A est le dessin de l'objet vu de l'œil gauche, en B celui du même objet vu de l'œil droit. Les rayons partis de ces deux images tombent sur deux lentilles *m* et *n*, et prennent, après les avoir traversées, exactement la même direction que s'ils venaient du point C; c'est donc là qu'apparaît en relief l'objet représenté en A et B.

Il est indispensable que les deux lentilles *m* et *n* impriment exactement la même déviation aux rayons, et pour cela elles doivent être rigoureusement identiques; M. Brewster a atteint ce résultat en coupant en deux une lentille biconvexe, et en plaçant la moitié

droite devant l'œil gauche, puis la moitié gauche devant l'œil droit, comme le représente la figure ci-dessus.

Pour produire la sensation du relief, les deux images dissemblables placées en A et en B doivent donner, de deux points de vue différents, une reproduction si fidèle du même objet qu'il serait impossible de les exécuter à la main ; aussi n'est-ce qu'avec le daguerréotype qu'on peut y parvenir. La figure 235 représente deux



Fig. 235. — Double épreuve photographique pour stéréoscope.

épreuves photographiques prises, sous un angle un peu différent, d'après une statuette de Franklin. On voit que celle de gauche est plus de face; c'est celle que doit regarder l'œil gauche, tandis que l'autre, qui est plus de profil, doit être vue de l'œil droit. Ces deux épreuves étant placées dans le stéréoscope, elles disparaissent pour l'observateur, car alors les deux sensations particulières à chaque œil se réunissent pour montrer une image unique, comme le représente la figure 236 ; et l'original apparaît sous une forme solide avec un relief si parfait qu'aucun effort d'imagination ne saurait faire croire qu'on n'a devant les yeux qu'un dessin sur une surface plane.

Le stéréoscope représenté ci-contre diffère un peu des stéréoscopes ordinaires; au lieu d'être fixées dans deux tubes, les lentilles

oculaires, qui sont larges et en contact par leurs bords, sont montées à la manière d'un lorgnon. De cette disposition, due à M. Duboscq, il résulte que quel que soit l'écartement des deux yeux,



Fig. 236. — Effet de relief dans le stéréoscope.

dans tous les cas, la vision s'opère nettement, ce qui peut ne pas avoir lieu quand les lentilles sont plus petites et montées dans des tubes, l'écartement de ces derniers n'étant pas toujours le même que celui des yeux de l'observateur.

LIVRE VII

MAGNÉTISME.

CHAPITRE PREMIER

PROPRIÉTÉS DES AIMANTS.

328. **Aimants naturels et aimants artificiels.** — L'*aimant naturel* ou *pierre d'aimant* est un minerai de fer qui possède la propriété d'attirer le fer et quelques autres métaux, particulièrement le nickel et le colbalt. Ce minerai est un oxyde de fer, c'est-à-dire un composé de fer et d'oxygène, de même que la rouille, dont il ne diffère que parce qu'il contient un peu moins d'oxygène.

La pierre d'aimant possède la faculté non moins remarquable, lorsqu'elle est mobile sur un pivot ou suspendue à un fil, de se diriger d'elle-même vers une partie déterminée de l'horizon; et par cette propriété, cette pierre mystérieuse, d'un brun noir, sans éclat ni brillant, mérite cependant d'être placée bien au-dessus des pierres précieuses les plus recherchées. C'est elle, en effet, qui, comme un nouveau fil d'Ariane, guide les navigateurs au milieu des ténèbres, leur donnant le moyen de se diriger avec la même sécurité sur les mers que s'ils suivaient une voie frayée.

La pierre d'aimant, *pierre aimante*, était connue des anciens, qui la désignaient sous les noms de *pierre de Lydie*, *pierre d'Héraclée*, *pierre de Magnésie*, parce qu'ils trouvèrent d'abord ce minerai près de la ville de Magnésie, nommée aussi Héraclée, en Lydie; et c'est du nom de la ville de Magnésie que les Grecs donnèrent à l'aimant le nom de *magnès*, d'où est venu le mot *magnétisme*, sous lequel les physiciens désignent aujourd'hui l'ensemble des phénomènes que présentent les aimants. On rencontre des aimants naturels sur presque tous les points du globe; les plus puissants viennent de Suède, de Norvége et des Indes orientales.

Outre les aimants naturels, il existe aussi des ***aimants artificiels,*** ainsi nommés parce qu'ils sont le produit de l'art. Ils sont en acier, substance composée de fer et d'une très-petite quantité de carbone. Lorsqu'on ***trempe*** l'acier, c'est-à-dire lorsqu'on le porte à une température élevée et qu'on le refroidit brusquement en le projetant dans l'eau froide, il acquiert une grande dureté, et c'est cette propriété qui le fait rechercher pour la fabrication de tous les instruments tranchants. Or, naturellement, l'acier n'attire pas le fer, mais lorsqu'il est trempé, on lui communique cette propriété en le frictionnant avec un fort aimant, et c'est alors qu'il devient lui-même un aimant.

Les aimants artificiels possèdent entièrement les mêmes propriétés que les aimants naturels, mais ils sont beaucoup plus puissants; aussi sont-ils les seuls généralement employés dans les expériences. On leur donne tantôt la forme de forts ***barreaux*** de 30 à 40 centimètres de longueur, tels que ceux représentés dans les figures 245 et 246; tantôt celle de fer à cheval (fig. 247); ou enfin, lorsqu'ils doivent être mobiles, on les taille en lames minces très-allongées, comme on le voit dans la figure 239. Au milieu de la lame est enchâssée une pierre d'agate, creusée en dessous de manière à recevoir un pivot d'acier sur lequel elle tourne librement. Ainsi disposé, l'aimant artificiel prend le nom d'***aiguille aimantée.***

329. **Distribution de la force magnétique dans les aimants.** — La force avec laquelle un aimant attire le fer n'est pas la même dans toutes ses parties. C'est aux extrémités qu'a lieu la plus grande attraction; de là elle décroît rapidement en avançant vers la partie médiane, où elle est nulle. Pour le démontrer, on plonge un barreau aimanté dans de la limaille de fer, et lorsqu'on l'en retire on voit la limaille adhérer à l'extrémité du barreau en filaments longs et serrés (fig. 237); mais si l'on roule l'aimant tout entier dans de la limaille, aucune parcelle ne s'attache à la partie moyenne de l'aimant.

Les deux extrémités, où a lieu la plus grande attraction, s'appellent les ***pôles*** de l'aimant, et la partie médiane, où l'attraction est nulle, est la ***ligne neutre.*** Tout aimant, naturel ou artificiel, quelle que soit sa forme, a deux pôles et une ligne neutre. Quelquefois, outre les deux pôles principaux, on observe dans la lon-

gueur des barreaux des pôles intermédiaires qu'on nomme ***points conséquents***. Cela tient à une trempe inégale ou à des frictions irrégulières lorsqu'on a aimanté le barreau. Nous supposerons toujours que les aimants n'ont que deux pôles.

L'action des aimants sur le fer s'exerce au travers de tous les

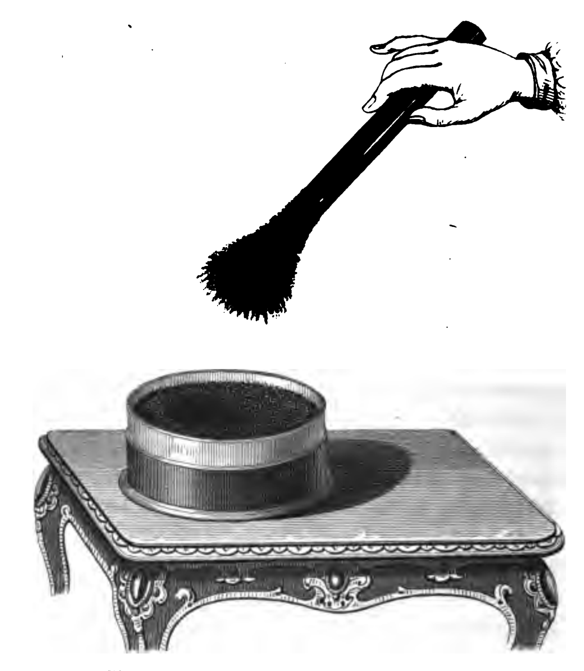


Fig. 237. — Aimant portant de la limaille de fer.

corps. Par exemple, on place un barreau aimanté sur une table, puis on pose dessus une feuille de carton, et avec un petit tamis on fait tomber dessus de la limaille de fer. Or, à mesure que celle-ci tombe, sollicitée par l'attraction respective des deux pôles, elle se dispose en longs filaments qui vont, en courbes régulières, se réunir d'un pôle à l'autre, comme on le voit dans la figure 238 ; mais au-dessus de la région moyenne de l'aimant, il ne se manifeste au-

cune action, et la limaille s'y dépose comme elle le ferait sur toute autre substance.

330. **Hypothèse des deux fluides magnétiques; lois de leurs attractions et répulsions mutuelles.** — Lorsque l'on compare entre eux les deux pôles d'un aimant relativement à l'action attractive qu'ils exercent sur le fer, on observe une identité complète; mais il n'en est plus ainsi des actions mutuelles qui s'exercent entre les



Fig. 238. — Action des aimants au travers des corps.

pôles de deux aimants. En effet, si au même pôle d'une aiguille magnétique *ab*, mobile sur un pivot (fig. 239), on présente successivement les deux pôles d'un barreau aimanté qu'on tient à la main, on observe ce phénomène curieux que le pôle *a* de l'aiguille étant attiré par le pôle B du barreau, il est au contraire repoussé par l'autre pôle de ce dernier; ce qui montre que les pôles du barreau ne sont pas identiques entre eux, puisque l'un repousse le pôle *a* tandis que l'autre l'attire. On constate facilement la même différence entre les deux pôles de l'aiguille *ab*, car si l'on présente successivement le même pôle B du barreau à chaque extrémité de l'aiguille, on observe que le pôle *a* étant attiré, le pôle *b* est repoussé.

Pour expliquer cette action inverse des pôles des aimants, on a admis l'existence de deux *fluides magnétiques*, c'est-à-dire de deux

matières subtiles entourant les molécules des aimants, et douées de la propriété que chacune agit par répulsion sur elle-même et par attraction sur l'autre. D'après cette hypothèse, la différence entre les pôlés provient du fluide qui y prédomine; en sorte que les pôles qui contiennent le même fluide se repoussent, et ceux qui contiennent des fluides contraires s'attirent.

La terre, ainsi que nous le verrons bientôt (333), agissant sur

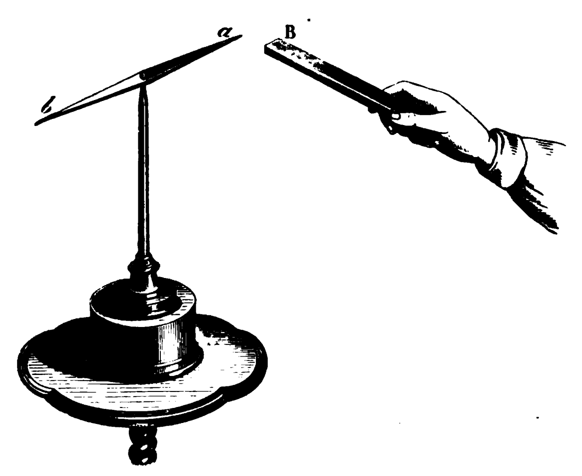


Fig. 239. — Attraction entre les pôles contraires.

les aiguilles magnétiques à la manière des aimants, on l'a elle-même assimilée à un immense aimant, dont les pôles magnétiques sont voisins des pôles terrestres, et dont la ligne neutre correspond à peu près à l'équateur. Par suite, on a appelé *fluide boréal* celui des deux fluides magnétiques qui se manifeste au pôle nord de la terre, et *fluide austral* celui qui règne au pôle sud.

Ces dénominations ont ensuite été appliquées aux pôles des aimants, et on a appelé *pôle boréal* non pas le pôle qui se dirige vers le nord, mais celui qui contient le fluide boréal; de même on a nommé *pôle austral* celui où se manifeste le fluide de ce nom. En sorte que c'est le pôle austral qui se tourne vers le nord, et le

pôle boréal vers le sud [1]. Cela posé, les attractions et les répulsions magnétiques sont soumises aux deux lois suivantes :

1° *Les pôles de nom contraire s'attirent, et ceux de même nom se repoussent ;*

2° *Les attractions et les répulsions s'exercent en raison inverse du carré de la distance.*

331. **Influence des aimants sur les substances magnétiques.** — On nomme ***substances magnétiques*** les substances qui contiennent les deux fluides magnétiques, mais à l'état neutre, c'est-à-dire s'équilibrant l'un et l'autre par leur action contraire ; ces substances sont le fer, l'acier, le nickel, le cobalt. Les aimants renferment aussi les deux fluides, mais il y a entre eux et les substances magnétiques cette différence, que dans les aimants les deux fluides sont séparés et produisent chacun un effet opposé, tandis que dans les substances magnétiques les fluides sont combinés et ne produisent aucun effet. En un mot, les substances magnétiques sont susceptibles de s'aimanter, mais ne le sont pas encore; elles ne présentent ni pôles, ni ligne neutre.

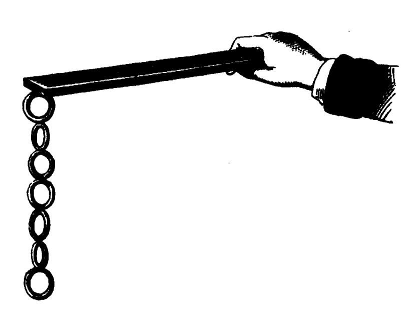


Fig. 240. — Aimantation par influence.

Lorsqu'une substance magnétique est mise en contact avec un des pôles d'un aimant, avec le pôle boréal, par exemple, celui-ci agissant par attraction sur le fluide austral de la substance et repoussant au contraire le fluide boréal, il en résulte dans cette substance une séparation des deux fluides, qui donne naissance à deux pôles et produit un véritable aimant. En effet, si l'on présente à un barreau aimanté un objet de fer quelconque, un petit anneau, par exemple, non-seulement celui-ci est porté, mais il acquiert la propriété d'en porter un second, puis ce second un troisième, et ainsi

1. Dans nos dessins, le pôle austral sera toujours représenté par la lettre *a* ou A, et le pôle boréal par *b* ou B.

de suite, chacun devenant un aimant par l'action de celui qui est au-dessus (fig. 240). Mais enlevez le barreau, le lien invisible de cette chaîne merveilleuse est aussitôt rompu et tous les anneaux se séparent.

Ce mode d'action d'un aimant sur une substance magnétique constitue l'*aimantation par influence*. Dans la théorie des deux



Fig. 241. — Attraction par les aimants.

fluides, c'est par suite d'une aimantation par influence que l'aimant attire le fer et les autres substances magnétiques, c'est-à-dire que l'aimant commence par séparer les deux fluides de la substance, puis c'est ensuite le fluide contraire de celle-ci qui est attiré par celui de l'aimant.

On a un exemple de cette attraction des substances magnétiques par les aimants dans un jouet d'enfant représenté dans la figure 241. Au milieu d'un vase plein d'eau est un petit cygne en émail, dans le bec duquel est un morceau de fer. Lorsqu'on lui présente un aimant, on le voit s'avancer lentement en vertu de l'attraction qui

s'exerce sur le fer. On rend l'expérience plus piquante en dissimulant l'aimant dans un morceau de pain.

332. **Force coercitive.** — Toutes les substances magnétiques ne se prêtent pas également à l'action par influence qu'exercent sur elles les aimants. Dans les unes, la séparation des deux fluides s'opère sans obstacle et pour ainsi dire instantanément : tel est surtout le fer *doux*, c'est-à-dire le fer pur ; mais dans d'autres, au contraire, la séparation des fluides présentant une résistance plus ou moins grande, ne s'obtient qu'à l'aide d'aimants puissants et exige un temps plus ou moins long ; dans ce dernier cas sont l'acier trempé et le fer lorsqu'il est combiné à des corps étrangers, tels que le soufre, le phosphore.

La résistance qu'il faut vaincre pour séparer les deux fluides magnétiques a été nommée *force coercitive*, d'un mot latin qui veut dire *resserrer*. Dans le fer doux, cette force est nulle ; dans l'acier, elle est très-grande et croît avec le degré de trempe. C'est pourquoi le fer doux, mis en contact avec un aimant, devient aussitôt un aimant ; mais il perd ses propriétés magnétiques dès qu'il est éloigné, parce que les fluides qui s'étaient séparés instantanément se réunissent de même. C'est l'inverse avec l'acier ; mis en contact avec un barreau aimanté, il ne s'aimante que lentement ; mais séparé du barreau, la même force coercitive qui s'opposait à la séparation des deux fluides, s'oppose actuellement à leur réunion, et l'acier conserve toujours, au moins en partie, l'aimantation qu'il a reçue.

CHAPITRE II

MAGNÉTISME TERRESTRE, BOUSSOLES.

333. **Direction des aimants vers le nord.** — On a déjà vu (328) que l'attraction que les aimants exercent sur le fer n'est pas la seule propriété remarquable qu'ils nous offrent ; ils possèdent encore celle non moins curieuse de se placer d'eux-mêmes dans la direction du nord au sud, toutes les fois qu'ils sont suspendus de manière à pouvoir tourner librement dans le sens horizontal. Par exemple,

si l'on prend une aiguille aimantée mobile sur un pivot, comme celle représentée dans la figure 242, on la voit toujours, dans quelque position qu'on la place, prendre exactement la même direction, son pôle austral regardant le nord, et son pôle boréal le sud. Écartez-la, soit avec le doigt, soit par l'influence repoussante ou attirante d'un autre aimant, dès que l'obstacle est écarté, elle revient avec empressement à sa première position, sans se tromper d'un centième de millimètre.

Si, au lieu de placer l'aiguille sur un pivot, on la pose sur un disque de liége, et celui-ci dans un vase d'eau, on voit le disque tourner lentement sur lui-même et s'arrêter lorsque l'aiguille a pris encore exactement la même direction qu'elle prenait étant sur le pivot. Or, dans cette seconde expérience, il importe d'observer que le disque de liége ne fait que tourner dans un sens ou dans l'autre, restant au milieu du vase, sans avancer ni vers le nord ni vers le sud; d'où l'on doit conclure que la force qui agit sur l'aiguille pour l'orienter vers le nord est simplement *directrice*, mais non attractive.

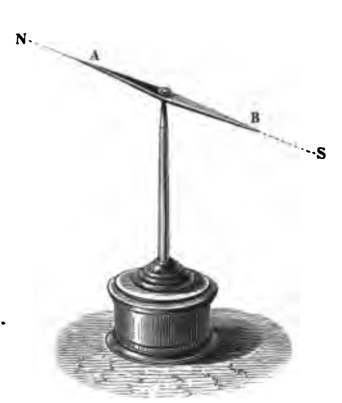


Fig. 242. — Action directrice de la terre.

Les mêmes observations ayant été répétées sur tous les points du globe, partout on a remarqué que, dans notre hémisphère, c'est le pôle austral de l'aiguille qui se porte vers le pôle nord de la terre, et que, dans l'autre hémisphère, c'est le pôle boréal qui se dirige vers le pôle sud du globe. C'est en se basant sur ces phénomènes que les physiciens ont été conduits à regarder la terre comme un immense aimant ayant deux pôles magnétiques voisins des pôles terrestres, et une ligne neutre se confondant sensiblement avec l'équateur. Cependant, en traitant des courants électriques, on verra qu'on peut donner une autre explication de l'action directrice de la terre sur l'aiguille aimantée.

334. **Méridien magnétique, déclinaison, variations.** — Lorsqu'une aiguille aimantée s'est orientée vers le nord, si l'on conçoit une droite indéfinie passant par ses deux pôles (fig. 242), cette droite est ce qu'on nomme le *méridien magnétique* du lieu où est située l'aiguille. Or, comme sa direction ne coïncide pas, en général, avec le méridien astronomique du même lieu, c'est-à-dire avec le plan qui passe par l'axe du monde et par le centre du soleil à midi, on appelle *déclinaison* de l'aiguille aimantée l'angle que fait le méridien magnétique avec le méridien astronomique. En d'autres termes, l'aiguille aimantée ne se dirigeant pas rigoureusement vers le pôle boréal de la terre, la déclinaison est l'écartement qui existe entre sa direction et celle du nord vrai. Tantôt le pôle nord de l'aiguille, pour un observateur tourné vers le septentrion, se porte à l'ouest du méridien, tantôt à l'est; dans le premier cas, on dit que la déclinaison est *occidentale;* dans le second, qu'elle est *orientale.*

Non-seulement la déclinaison de l'aiguille n'est pas la même pour tous les points du globe, mais en chaque lieu elle subit des variations continuelles. A Paris, en 1663, elle était nulle, c'est-à-dire que l'aiguille se dirigeait exactement vers le nord. Antérieurement elle était orientale. Depuis lors elle est occidentale, et a toujours augmenté jusqu'en 1814, année où elle a atteint 22° 14′. A partir de cette époque, elle décroît constamment et n'est plus aujourd'hui que de 20 degrés vers l'ouest.

Outre les variations lentes que nous venons de signaler, et qu'on désigne sous le nom de *variations séculaires*, la déclinaison de l'aiguille aimantée subit encore des variations accidentelles nommées *perturbations;* lesquelles se manifestent lors de la chute de la foudre, pendant les éruptions volcaniques, et pendant l'apparition des aurores boréales.

335. **Boussole de déclinaison.** — La propriété que possèdent les aimants de se diriger vers le nord a reçu une importante application dans la *boussole de déclinaison.* Ce petit instrument, représenté à peu près en grandeur naturelle dans la figure 243, se compose d'une boîte de métal ou de bois, au fond de laquelle est figurée une étoile à seize branches représentant la rose des vents. Le contour porte un cercle gradué, dont le zéro de la graduation se

trouve sur la ligne NS qui marque la direction du nord au sud. Enfin, au centre de la boîte est un pivot d'acier sur lequel repose une aiguille aimantée très-mobile.

Lorsque l'on connaît le méridien astronomique, il est facile de déterminer la déclinaison au moyen de la boussole. Il suffit de l'orienter de manière que la ligne NS soit exactement dans la

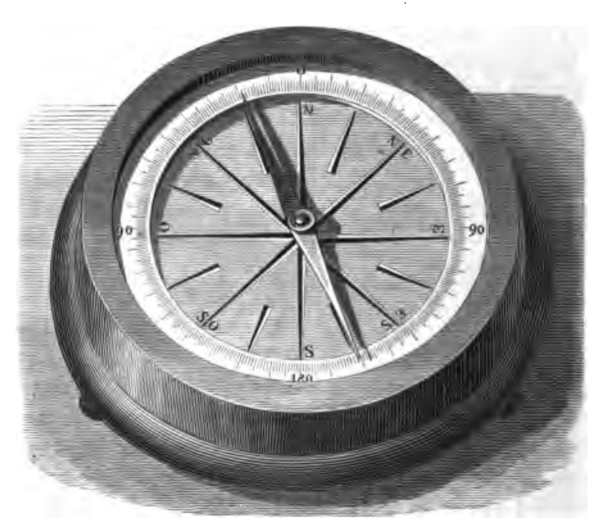


Fig. 243. — Boussole de déclinaison.

direction du méridien du lieu où l'on se trouve. Le point où s'arrête l'aiguille marque la déclinaison. Si, au contraire, celle-ci étant connue, on veut trouver le méridien astronomique, on tourne lentement la boussole jusqu'à ce que l'aiguille s'écarte de la ligne NS d'une quantité égale à la déclinaison, et dans le même sens, c'est-à-dire vers l'occident, si elle est occidentale, et vers l'orient si elle est orientale; la ligne NS prolongée représente alors la direction du méridien astronomique.

La facilité avec laquelle la boussole de déclinaison permet de retrouver toujours un même point de l'horizon, en a fait l'instrument le plus précieux pour les voyages sur mer. Avant sa décou-

verte, qui paraît dater du XIIe siècle, la navigation, lente et timide, se bornait au parcours des côtes, qu'on ne pouvait perdre de vue sans s'exposer à s'égarer au milieu des mers. Mais guidés par les indications de la boussole, que ne troublent ni les ténèbres les plus profondes, ni les tempêtes les plus violentes, les navigateurs ont pu, la nuit comme le jour, suivre leur véritable route; et c'est alors qu'osant perdre de vue les côtes, ils ont découvert l'Amérique et fait le tour du monde.

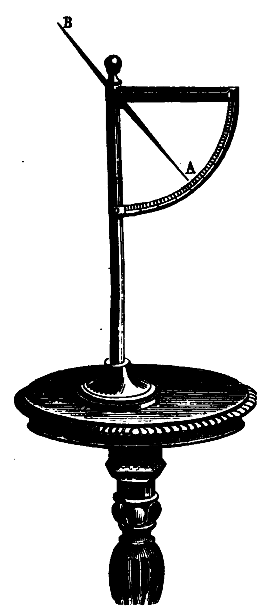


Fig. 244. — Boussole d'inclinaison.

La boussole de déclinaison est aussi utilisée par les ouvriers mineurs pour se diriger dans la construction des galeries souterraines qu'ils creusent pour l'exploitation des mines. Enfin, elle est encore appliquée avec avantage aux levées des plans.

336. **Boussole d'inclinaison.** — Lorsqu'une aiguille d'acier reposant sur un pivot vertical, comme celle représentée dans la figure 242, a été travaillée de manière à se tenir parfaitement horizontale *avant l'aimantation*, on observe que lorsqu'elle est aimantée, elle cesse de conserver sa position horizontale, et que le pôle austral, celui dirigé vers le nord, incline au-dessous de l'horizon. On s'en prit d'abord à un défaut de construction, mais la régularité du phénomène fit enfin voir qu'il fallait l'attribuer à l'action directrice même de la terre. Alors, pour laisser à l'aiguille magnétique toute liberté d'obéir à cette force, on modifia son mode de suspension, et on la fixa à un axe horizontal, comme le montre la figure 244. L'aiguille est alors mobile de haut en bas dans un plan vertical, et l'angle qu'elle fait avec l'horizon se lit sur un cadran divisé en 90 degrés.

Ainsi disposé, cet appareil a reçu le nom de ***boussole d'inclinaison***, et on appelle ***inclinaison magnétique***, l'angle que l'ai-

guille AB fait avec l'horizon. De même que la déclinaison, l'inclinaison change avec le temps. A Paris, elle était de 75 degrés en 1671 ; depuis, elle va toujours en décroissant, et elle n'est plus aujourd'hui que de 66 degrés. De plus, elle varie avec la distance au pôle terrestre. Dans notre hémisphère, c'est le pôle austral de l'aiguille qui plonge au-dessous de l'horizon et fait avec lui un angle d'autant plus grand qu'on avance davantage vers le pôle nord du globe. A peu près à 15 degrés de ce point, l'inclinaison est de 90 degrés, c'est-à-dire que l'aiguille est verticale ; puis l'inclinaison décroît de plus en plus à mesure qu'on revient vers l'équateur. Sur ce cercle, ou en des points peu distants, l'inclinaison devient nulle, et l'aiguille est alors horizontale.

Dans l'autre hémisphère, l'inclinaison reparaît, mais c'est alors le pôle boréal qui s'abaisse au-dessous de l'horizon, d'autant plus qu'on approche davantage du pôle austral de la terre.

CHAPITRE III

PROCÉDÉS D'AIMANTATION.

337. **Aimantation par l'influence magnétique de la terre.** — Aimanter une substance, c'est lui transmettre les propriétés magnétiques, c'est-à-dire celle d'attirer le fer et de se diriger vers le nord. Les seules substances qui puissent s'aimanter d'une manière durable sont l'acier trempé et l'oxyde de fer constituant les aimants naturels. L'aimantation peut se produire lentement par l'influence prolongée de la terre, ou rapidement par la friction avec un aimant, ou enfin, par l'action de l'électricité, et, dans ce cas, l'aimantation est instantanée.

Les oxydes de fer qu'on trouve tout aimantés dans la nature, ne le sont point essentiellement ; on en trouve fréquemment qui ne possèdent aucune vertu magnétique. Mais ils sont aptes à être aimantés, et une fois qu'ils le sont, ils conservent cette propriété, en vertu de la force coercitive dont ils sont doués. Les aimants naturels doivent leur aimantation à l'action lente du magnétisme

terrestre, qui à la longue a séparé les deux fluides. Il en est de même des vieilles ferrailles oxydées, qui, généralement sont aimantées par la même cause.

L'action magnétique du globe est même assez puissante pour être utilisée directement comme source d'aimantation. A cet effet, on prend un fil de fer un peu gros, et on le place dans la direction du méridien magnétique, en lui faisant faire avec l'horizon un angle égal à l'inclinaison. Dans cette position, le magnétisme

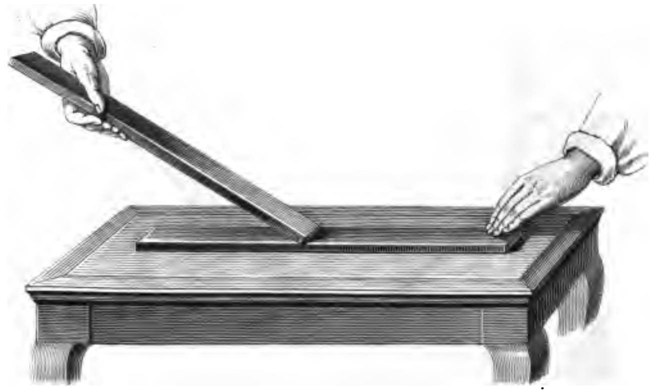


Fig. 245. — Aimantation par frictions simples.

terrestre, agissant par influence sur le fil de fer, sépare ses deux fluides, dirigeant vers l'extrémité inférieure le fluide austral, et vers l'autre extrémité le fluide boréal. Toutefois, ce n'est là qu'une aimantation instable, car si l'on retire le fil de fer de sa position, aussitôt les deux fluides se recombinent. Il n'en est plus de même si, tandis que le fil est dans la position indiquée ci-dessus, on le bat sur une enclume avec un marteau, ou si, prenant ses extrémités entre deux pinces, on le tord sur lui-même. La pression ou la torsion qu'il subit alors lui communique une force coercitive suffisante pour conserver son aimantation, au moins pendant un certain temps. En réunissant plusieurs fils de fer ainsi aimantés, de manière que les pôles de même nom soient ensemble, on peut obtenir un aimant assez puissant.

338. **Aimantation par frictions.** — Pour aimanter les barreaux d'acier et les aiguilles de boussole, le procédé généralement employé est l'aimantation par frictions, qui se divise en frictions par ***simple touche***, par ***touche séparée*** et par ***double touche***.

Dans l'aimantation par simple touche, tenant d'une main le barreau d'acier qu'on veut aimanter, de l'autre on passe dessus, dans le sens de la longueur, le pôle d'un fort barreau aimanté, comme le montre la figure 245. Après avoir répété plusieurs fois ces fric-



Fig. 246. — Aimantation par double touche.

tions, le barreau d'acier se trouve aimanté. Tous les objets d'acier, tels que couteaux, ciseaux, peuvent s'aimanter de la même manière, et leur aimantation est d'autant plus durable qu'ils sont plus fortement trempés.

Dans le procédé de la touche séparée, on frictionne à la fois le barreau d'acier avec les pôles contraires de deux aimants, en sens opposé, du milieu vers les extrémités.

Enfin, l'aimantation par double touche consiste encore à faire usage de deux forts aimants pour opérer les frictions; mais au lieu de les faire glisser en sens contraire du milieu vers les extrémités, comme dans le procédé de la touche séparée, on les réunit, les pôles

contraires en regard et maintenus seulement à un faible intervalle au moyen d'une petite pièce de bois (fig. 246); puis on les fait glisser ensemble du milieu à une extrémité, de celle-ci à l'autre, et ainsi de suite plusieurs fois, en ayant soin de s'arrêter au milieu de manière que chaque moitié reçoive le même nombre de frictions.

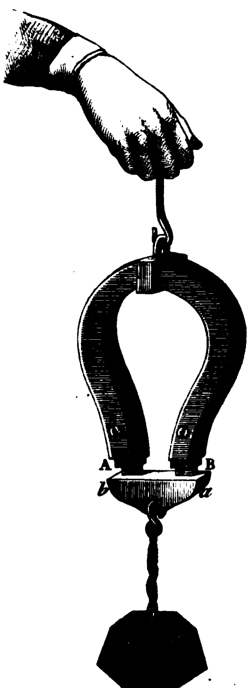


Fig. 247. — Faisceau en fer à cheval.

Quant à l'aimantation par l'électricité, elle sera traitée en parlant des propriétés des courants électriques.

339. **Faisceaux aimantés, armures des aimants.** — On nomme *faisceau aimanté* un système de barreaux aimantés réunis parallèlement, les pôles de même nom en regard. Tantôt les barreaux sont droits comme ceux représentés dans les figures 245 et 246, et alors on a un *faisceau rectiligne;* tantôt ils sont recourbés de manière à rapprocher les pôles contraires, et alors on a un *faisceau en fer à cheval* (fig. 247).

Les aimants, soit naturels, soit artificiels, perdraient promptement de leur force, s'ils étaient abandonnés à eux-mêmes, c'est pourquoi il importe de leur donner des *armures;* on nomme ainsi des pièces de fer doux qu'on met en contact avec les pôles; telle est la pièce *ab* dans la figure 247. Les deux pôles du faisceau agissant par influence sur cette pièce (331), y déterminent, en *a*, un pôle austral, et, en *b*, un pôle boréal. Or, ces deux pôles réagissant à leur tour sur le faisceau aimanté et s'opposant à la recomposition de ses deux fluides, lui conservent toute sa force. La pièce *ab* se désigne aussi sous le nom de *portant*, parce que c'est à cette pièce qu'on suspend les poids qu'on veut faire porter au faisceau aimanté, poids qui peuvent s'élever jusqu'à 20 kilogr. et plus.

LIVRE VIII

ÉLECTRICITÉ.

CHAPITRE PREMIER

PHÉNOMÈNES FONDAMENTAUX.

340. **Découverte de l'électricité.** — Dès 600 ans avant l'ère chrétienne, le philosophe Thalès de Milet, l'un des sept sages de la Grèce, savait que le succin ou ambre jaune, frotté vivement avec de la laine, acquiert la propriété d'attirer les corps légers, tels que de petits morceaux de papier, des barbes de plume, des brins de paille. Comparant ce phénomène à l'aspiration de l'air avec la bouche, les Grecs disaient que l'ambre *aspirait* les corps légers, qu'il avait un *souffle*. Vu la rareté de l'ambre, espèce de résine qu'on ne trouve qu'à l'état fossile, et dont encore aujourd'hui on ignore l'origine, ils allaient jusqu'à dire que cette substance provenait des larmes d'un oiseau de l'Inde affligé de la mort du roi Méléagre.

Six siècles plus tard, on trouve que Pline, célèbre naturaliste romain, ne possède pas une connaissance plus approfondie de la propriété de l'ambre jaune. « Quand le frottement des doigts, écrit-il, lui a donné la chaleur et la vie, cette substance attire les brins de paille comme l'aimant attire le fer. » Là se bornent les faits observés par les anciens, et les siècles s'écoulent sans qu'aucun fait nouveau surgisse. Ce n'est qu'à la fin du XVIe siècle qu'un Anglais, William Gilbert, médecin de la reine Élisabeth, attire de nouveau l'attention des observateurs sur la propriété attractive de l'ambre jaune, en faisant voir qu'un grand nombre d'autres substances, comme le verre, les résines, le soufre, la soie, le diamant, acquièrent la propriété d'attirer les corps légers, lorsqu'elles ont été frottées avec une étoffe de laine ou une peau de chat.

Pour répéter cette expérience, on frotte avec un morceau de drap un tube de verre ou un bâton de cire à cacheter, substance connue aussi sous le nom de *cire d'Espagne*, et qui n'est autre chose que de la résine colorée en rouge par du vermillon; en présentant ensuite ce tube ou ce bâton à des corps légers, tels que des feuilles d'or, des barbes de plume, de petits morceaux de papier, on voit ceux-ci fortement attirés (fig. 248).

On reconnut bientôt que le verre, la résine et les autres substances nommées ci-dessus n'acquièrent pas seulement, quand on les frotte, la propriété attractive, mais qu'elles deviennent lumineuses, donnent des étincelles, présentent enfin une foule d'autres phénomènes dont la cause a été désignée sous le nom général d'*électricité*, d'un mot grec qui signifie *ambre jaune*, pour exprimer que c'est sur cette substance qu'ils ont d'abord été observés.



Fig. 248. — Bâton de résine électrisé.

Autant les découvertes électriques avaient marché avec lenteur dans l'antiquité et dans le moyen âge, autant leur progrès a été rapide dans les XVIIIe et XIXe siècles. Depuis soixante-dix ans surtout, les faits nouveaux ont été si nombreux et si remarquables, leurs applications si importantes et si curieuses, qu'on a comparé avec raison l'électricité à une fée complaisante à laquelle il suffirait de demander des prodiges pour les voir aussitôt se réaliser.

341. **Sources d'électricité.** — Les causes qui développent de l'électricité sont nombreuses : on peut les diviser en sources mécaniques, physiques et chimiques.

Les *sources mécaniques* sont le frottement, la pression et la séparation des molécules. Par exemple, lorsqu'on casse un morceau de sucre dans l'obscurité, on remarque une lueur faible qui est due à l'électricité dégagée au moment de la ségrégation des moléules.

Les ***sources physiques*** sont les variations de température ; on en constate les effets dans quelques minéraux, et surtout dans la tourmaline et la topaze, qui manifestent des propriétés électriques dès qu'on les chauffe ou qu'on les refroidit.

Enfin, les ***sources chimiques*** sont les combinaisons et les décompositions des corps. Par exemple, les métaux, comme le zinc, le fer, le cuivre, plongés dans un acide, sont attaqués par cet acide avec

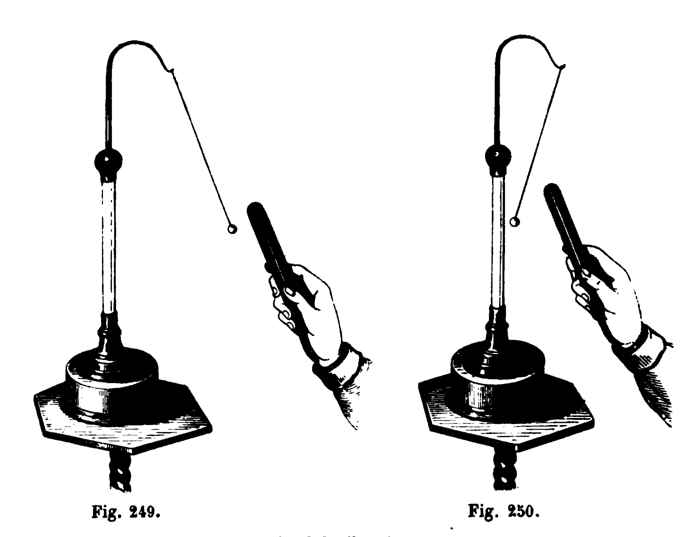


Fig. 249. Fig. 250.

Pendule électrique.

lequel ils s'unissent pour former des sels. Or, pendant ces combinaisons, il se développe des quantités considérables d'électricité ; il en est de même dans les décompositions chimiques, c'est-à-dire dans la séparation des éléments des corps.

Les deux plus puissantes sources d'électricité sont le frottement et les actions chimiques. Nous allons d'abord nous occuper uniquement de l'électricité due à la première cause ; nous étudierons plus tard la seconde sous le nom d'*électricité voltaïque*.

342. **Électroscopes, pendule électrique.** — On désigne sous le nom général d'*électroscopes* tous les appareils propres à faire recon-

naître qu'un corps est électrisé. Le plus simple est le *pendule électrique*, qui consiste en une petite boule de moelle de sureau suspendue à un fil de soie, comme le représente la figure 249 ; ce fil est attaché à une tige de cuivre portée elle-même sur un pied de verre.

Cela posé, pour constater si un corps est ou n'est pas électrisé, il suffit de le présenter au pendule électrique ; dans le premier cas il y a attraction, tandis que dans le second il n'y a rien. Toutefois, un corps chargé d'une tres-faible quantité d'électricité n'agirait pas sur le pendule électrique ; il faut alors avoir recours à des appareils plus sensibles, qui seront décrits plus tard sous le nom d'*électromètres*.

343. **Expérience qui conduit à distinguer deux espèces d'électricité.** — Lorsqu'on présente au pendule électrique un bâton de cire à cacheter, frotté avec du drap, la petite boule est d'abord fortement attirée par la résine, mais aussitôt qu'elle l'a touchée, elle en est vivement repoussée, comme le montre la figure 250. Si, au lieu d'un bâton de résine, on présente un tube de verre frotté, même attraction, puis même répulsion aussitôt après le contact. Jusque-là il y a donc identité entre l'électricité développée sur la résine et celle développée sur le verre ; mais on va voir que ces électricités diffèrent. En effet, lorsque le bâton de résine a touché la petite boule et la repousse, si on approche de celle-ci le tube de verre, on remarque qu'elle se précipite sur lui. De même, après que le verre a touché la boule et la repousse à son tour, elle est fortement attirée par la résine. L'électricité du verre n'est donc pas la même que celle de la résine, puisque chacune attire ce que l'autre repousse, et réciproquement. C'est à Dufay, physicien français, qu'on doit, en 1734, la connaissance des deux électricités qui se dégagent par le frottement, l'une sur le verre et l'autre sur la résine. La première a reçu le nom d'*électricité vitrée*, et la seconde celui d'*électricité résineuse*.

344. **Hypothèse des deux fluides électriques.** — Malgré les nombreuses découvertes faites en électricité, on ignore encore et on ignorera probablement toujours la nature de cet agent physique. Néanmoins, se basant sur les effets opposés qui avaient conduit Dufay à la découverte de deux électricités différentes, on a admis

l'hypothèse de deux fluides invisibles et tres-subtils, existant simultanément et en quantités égales dans tous les corps, où ils se neutralisent mutuellement, formant ce qu'on appelle le *fluide neutre*. Celui-ci, dont la terre peut être regardée comme un immense réservoir, n'a par lui-même aucune propriété particulière, et les corps qui le contiennent sont à l'*état neutre;* mais si, par le frottement, par les actions chimiques, ou par toute autre cause, le fluide neutre vient à être décomposé, si les deux fluides sont séparés, aussitôt apparaissent les phénomènes électriques.

Ces deux fluides ont d'abord reçu les noms de *fluide vitré* et de *fluide résineux;* mais ces dénominations sont généralement remplacées aujourd'hui par celles de *fluide positif* et de *fluide négatif*, expressions adoptées par Franklin, et qui marquent mieux l'opposition qui existe entre eux. L'électricité positive se représente par le signe +, qui, en algèbre, s'énonce *plus;* et l'électricité négative par le signe —, qui s'énonce *moins*.

L'hypothèse des deux fluides électriques est due à Symner, physicien anglais; c'est en les séparant que le frottement développe de l'électricité. Par exemple, lorsqu'on frotte un tube de verre avec de la laine, le fluide neutre du corps frottant et celui du corps frotté se trouvant décomposés, le fluide positif se porte sur le verre, tandis que le fluide négatif se rend sur la laine. En frictionnant de la même manière un bâton de résine, c'est l'inverse qui a lieu; le fluide positif passe sur la laine, et le fluide négatif sur la résine.

345. **Lois des attractions et des répulsions électriques.** — Dans l'expérience du pendule électrique rapportée ci-dessus, on a vu le verre frotté attirer la boule de moelle de sureau, puis la repousser aussitôt qu'il y a eu contact. Or, comme pendant ce contact le verre cède à la boule une certaine quantité de son électricité positive, on en conclut que la répulsion a lieu lorsque le verre et la boule sont tous les deux électrisés positivement. En expérimentant avec le bâton de résine, on l'a vu repousser aussi la petite boule après le contact, c'est-à-dire une fois que l'un et l'autre sont électrisés négativement. Donc, dans les deux cas, les corps chargés de la même électricité se repoussent. De plus, comme la boule électrisée positivement par son contact avec le verre a été attirée par la

résine, et qu'électrisée par celle-ci, elle a été attirée par le verre, on en conclut encore que deux corps chargés d'électricités contraires s'attirent. On peut donc formuler cette loi générale sur l'action mutuelle des deux fluides électriques :

« Les fluides de même nom se repoussent, et ceux de nom contraire s'attirent. »

Coulomb, physicien français, a de plus constaté par l'expérience, à la fin du siècle dernier, que « les attractions et les répulsions électriques s'exercent en raison inverse du carré de la distance. »

346. **Corps conducteurs et corps isolants.** — Gray, physicien anglais, mort vers 1720, observa, le premier, que les corps électrisés revenaient instantanément à l'état neutre aussitôt qu'ils touchaient la terre, ou qu'ils étaient mis en communication avec elle soit par une tige métallique, soit par des supports de bois, de pierre, ou par des substances humides quelconques; mais qu'au contraire, posés sur du verre, de la soie, de la résine, du soufre, ces mêmes corps conservaient longtemps leur électricité. Il en conclut que certains corps donnaient un libre écoulement au fluide électrique vers la terre, qu'on appelle alors le ***réservoir commun***, tandis que d'autres s'opposaient à son passage. Les premiers corps ont reçu le nom de ***bons conducteurs***, et les seconds celui de ***non-conducteurs***, ou plutôt de ***mauvais conducteurs***, car il n'est pas de corps qui ne conduise un peu le fluide électrique. On donne encore à ces derniers le nom de ***corps isolants*** ou d'***isoloirs***, parce qu'on les emploie comme supports quand il s'agit de conserver à un corps conducteur l'électricité qu'on lui a communiquée.

Les meilleurs conducteurs du fluide électrique sont les métaux; après eux viennent la plombagine, le charbon bien calciné, les dissolutions salines ou acides, l'eau à l'état liquide ou de vapeur, le corps humain, les végétaux et, en général, toutes les substances humides.

Les mauvais conducteurs sont le soufre, les résines, les gommes, le caoutchouc, la gutta-percha, la soie, le verre, les pierres précieuses, le charbon non calciné, l'essence de térébenthine, les huiles, l'air et les gaz quand ils sont secs.

347. **Électrisation des corps conducteurs.** — Les corps isolants ne s'électrisent que par frottement; mais les corps conducteurs

peuvent être électrisés par trois procédés : par frottement, par contact et par influence. Toutefois, pour électriser un métal par frottement, il doit être isolé; fixé, par exemple, à un manche de verre, et frictionné en outre avec un corps isolant, comme un morceau de soie ou de taffetas ciré; sinon l'électricité développée par le frottement s'écoule immédiatement dans le sol par le bras et le corps de l'expérimentateur.

Quant à l'électrisation par contact, elle résulte de la conductibilité. En effet, lorsqu'un corps conducteur, à l'état neutre et isolé, touche un corps conducteur électrisé, une portion de l'électricité de ce dernier passe instantanément sur le premier. Si les deux corps sont de même forme et de même surface, par exemple deux sphères de même diamètre, le fluide se répartit alors également sur l'une et sur l'autre; mais si les corps en contact varient de forme ou de surface, l'électricité se distribue inégalement sur les deux.

Le troisième mode d'électrisation, celui par influence, sera traité ci-après (350).

348. **Accumulation du fluide électrique à la surface des corps.** — De nombreuses expériences font voir que lorsqu'un corps est électrisé, tout le fluide électrique se porte à la surface, où il s'accumule sous une couche extrêmement mince, tendant sans cesse à s'échapper, et se dégageant, en effet, aussitôt qu'il n'est retenu par aucun obstacle.

Parmi les expériences entreprises pour démontrer l'accumulation de l'électricité à la surface du corps, nous citerons surtout la suivante due à Coulomb. On a une sphère de cuivre isolée sur une colonne de verre; sur cette sphère s'appliquent exactement deux hémisphères creux, aussi en cuivre, munis chacun d'un manche de verre (fig. 251). Ces deux hémisphères étant appliqués sur la sphère de manière à la recouvrir exactement, on communique à tout le système une certaine quantité d'électricité en le mettant un seul instant en contact avec un corps électrisé, avec la machine électrique par exemple (351). Cela posé, si l'on enlève brusquement les deux hémisphères en les tenant de chaque main par les manches de verre, on reconnaît, en les présentant au pendule électrique, qu'ils sont tous les deux électrisés, tandis que la sphère,

présentée de la même manière au pendule, ne donne aucune trace d'électricité. On voit donc qu'en enlevant à un corps électrisé sa surface, on lui enlève en même temps tout le fluide libre qu'il contenait, fait qui prouve bien que celui-ci réside en entier à la surface.

Ce qui montre encore que l'électricité se porte uniquement à la

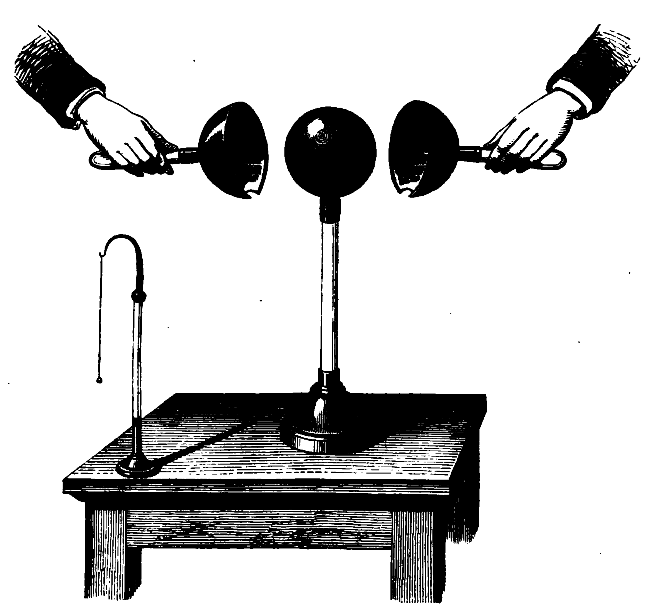


Fig. 251. — Boule de Coulomb.

surface des corps, c'est que deux sphères métalliques de même diamètre, l'une pleine et l'autre creuse, se chargent exactement de la même quantité d'électricité, lorsqu'on les fait communiquer avec une même source électrique.

Accumulé à la surface des corps, le fluide électrique tend toujours à s'écouler sur les objets voisins avec un effort qu'on désigne sous le nom de *tension*. Celle-ci augmente avec la quantité d'électricité. Tant qu'elle n'a pas dépassé une certaine limite, elle est

équilibrée par la resistance que lui présente la mauvaise conductibilité de l'air, quand il est sec; mais si la tension augmente, cette résistance est vaincue, et l'électricité jaillit avec bruit et lumière, sous forme d'une vive étincelle. Dans l'air humide, la tension est toujours faible, parce que le fluide électrique s'écoule lentement, conduit par la vapeur d'eau. Dans le vide, où il n'y a pas de résistance, la tension est nulle, et l'électricité se dégage d'une manière continue en répandant une faible lueur.

349. **Influence de la forme des corps sur l'accumulation de l'élec-**

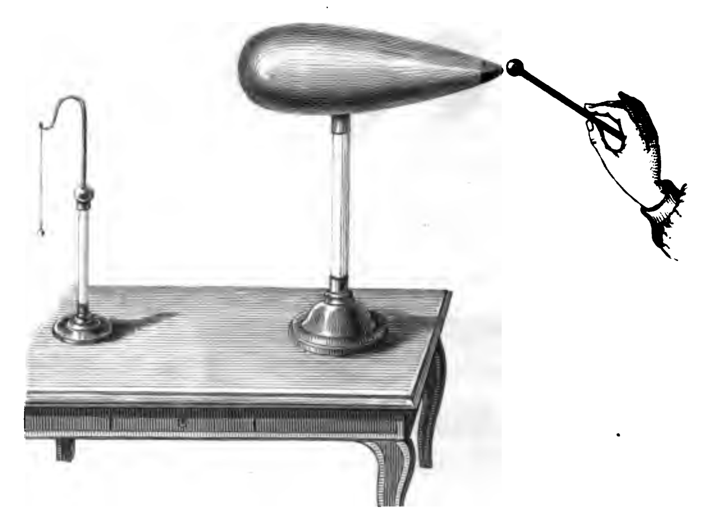


Fig. 252. — Distribution de l'électricité à la surface des corps.

tricité ; pouvoir des pointes. — La loi suivant laquelle le fluide électrique se distribue à la surface d'un corps conducteur varie avec la forme de celui-ci. S'il est sphérique, l'accumulation est partout la même, ce qu'on pouvait prévoir d'avance et ce qui se constate à l'aide du *plan d'épreuve*. On nomme ainsi un petit disque de clinquant fixé à l'extrémité d'un bâton de gomme laque, espèce de résine qui isole très-bien. Tenant ce bâton à la main, comme le représente la figure 252, on applique le petit disque successive-

ment sur différents points du corps électrisé, puis, après chaque contact, on le présente au pendule électrique. Or, si le corps qu'a touché le plan d'épreuve est une sphère métallique, on observe constamment la même attraction, ce qui montre que le disque a pris en chaque point de la sphère la même charge électrique, et, par suite, que la distribution du fluide électrique est uniforme.

Il n'en est plus ainsi lorsque le corps électrisé, que nous supposons toujours métallique, présente une forme plus ou moins allongée, par exemple la forme ovoïde, comme dans la figure ci-dessus. Dans ce cas, le plan d'épreuve se charge d'autant plus qu'on l'applique plus près de l'extrémité allongée, et c'est à cette extrémité même qu'on recueille le plus d'électricité. Cette expérience montre donc que, sur les corps conducteurs, l'électricité tend toujours à s'accumuler vers les parties allongées, vers les pointes. Or, de cette accumulation résulte une tension plus grande, suffisante pour vaincre la résistance de l'air et donner écoulement au fluide électrique. On remarque, en effet, que les corps métalliques munis d'une pointe perdent promptement leur électricité; et en plaçant la main au-dessus de cette pointe, on ressent comme un souffle léger qui s'en dégage. Si l'écoulement a lieu dans l'obscurité, on remarque en outre une aigrette lumineuse qui apparaît au-dessus de la pointe.

Cette propriété des pointes placées sur les corps conducteurs électrisés, de donner écoulement au fluide électrique, a été désignée sous le nom de *pouvoir des pointes* par Franklin, qui en a fait l'application aux paratonnerres.

CHAPITRE II

ÉLECTRISATION PAR INFLUENCE, MACHINES ÉLECTRIQUES.

350. **Influence des corps électrisés sur les corps à l'état neutre.** — Lorsqu'un corps conducteur à l'état neutre se trouve dans le voisinage d'un corps électrisé, le fluide de celui-ci agit à distance sur le fluide neutre du premier pour le décomposer, repousser le fluide de même nom et attirer celui de nom contraire. Cette action,

qui est une conséquence des attractions et des répulsions réciproques entre les deux fluides (345), et qui ne s'exerce pas seulement à toutes les distances, mais au travers de tous les corps isolants, comme l'air, le verre, les résines, est connue sous le nom d'*électrisation par influence.*

Pour la démontrer, on dispose l'expérience comme le représente la figure 253. Sur la droite du dessin est une machine électrique qui, ainsi qu'on le verra bientôt, est chargée de fluide positif (351);

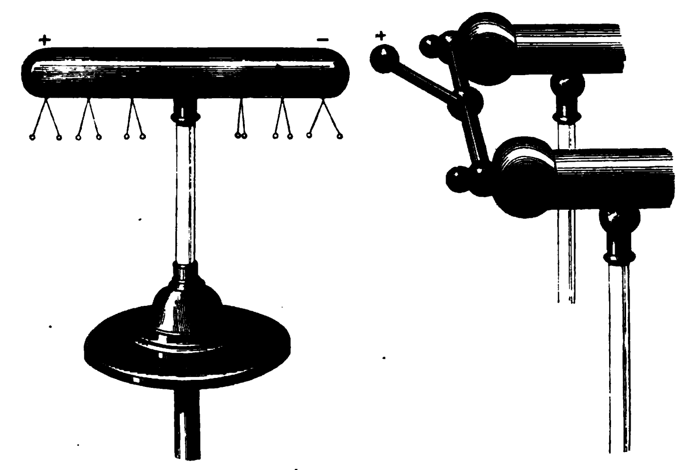


Fig. 253. — Électrisation par influence.

à gauche, est un cylindre de laiton isolé sur un pied de verre, et muni de petits pendules de moelle de sureau suspendus à des fils de chanvre, qui sont conducteurs. Cela posé, lorsqu'on approche lentement le cylindre de la machine électrique, on voit les petits pendules voisins se repousser et diverger entre eux, mais inégalement; c'est aux extrémités que se produit la plus grande divergence. Vers la partie médiane, les pendules restent en contact sans se repousser; d'où l'on conclut que c'est aux extrémités que se porte l'électricité et que le milieu du tube est à l'état neutre. De plus, si des pendules voisins de la machine électrique on approche un bâton de résine frotté, on observe qu'ils sont repoussés,

ce qui montre qu'ils sont chargés de la même électricité que la résine, c'est-à-dire d'électricité négative. De même, si on approche un tube de verre frotté de l'autre extrémité du cylindre, les pendules sont aussi repoussés, preuve qu'ils sont chargés d'électricité positive. Enfin, les électricités contraires ainsi accumulées aux extrémités opposées du cylindre sont en quantité égale, car si on l'éloigne de la machine, les pendules cessent de diverger, ce qui indique que les deux fluides d'abord séparés se recombinent actuellement pour donner du fluide neutre.

L'électrisation par influence, qui se produit sur les corps à l'état neutre dans le voisinage d'une source électrique, donne l'explication d'un grand nombre de phénomènes. Mais pour en interpréter tous les effets, il importe de savoir ce qui arrive lorsque, dans l'expérience ci-dessus, on fait communiquer avec le sol le cylindre isolé pendant qu'il est soumis à l'influence de la machine. Pour cela, supposons qu'on touche avec le doigt l'extrémité positive, c'est-à-dire celle qui est la plus écartée de la machine électrique, le fluide positif du cylindre s'écoule alors dans le sol, tandis que le fluide négatif reste, retenu par l'attraction de l'électricité contraire de la machine; en sorte que si l'on éloigne maintenant le cylindre, on voit les pendules continuer à diverger, et l'on vérifie à l'aide du bâton de résine qu'ils sont tous électrisés négativement. Mais si c'était sur l'extrémité négative qu'on eût d'abord posé le doigt, que serait-il arrivé? Est-ce alors le fluide négatif qui se serait écoulé dans le sol ? Non, c'est encore le fluide positif; effet facile à prévoir, puisque le fluide négatif est toujours attiré par le fluide contraire de la machine. C'est donc un principe général qu'un corps conducteur isolé étant soumis à l'influence d'une source électrique, « en quelque point qu'on le touche, c'est toujours l'électricité contraire à celle de la source qui reste sur le corps. »

APPAREILS FONDÉS SUR L'ÉLECTRISATION PAR INFLUENCE.

351. **Machine électrique.** — La *machine électrique* est un appareil qui sert à développer par le frottement une abondante quantité d'électricité. Elle fut inventée, il y a 200 ans, par Otto de

Guéricke, le même à qui est due la machine pneumatique. Elle se composa d'abord simplement d'une boule de soufre fixée à un axe de bois. Tandis qu'on faisait tourner cette boule d'une main, on posait l'autre dessus, et on l'électrisait ainsi uniquement par la

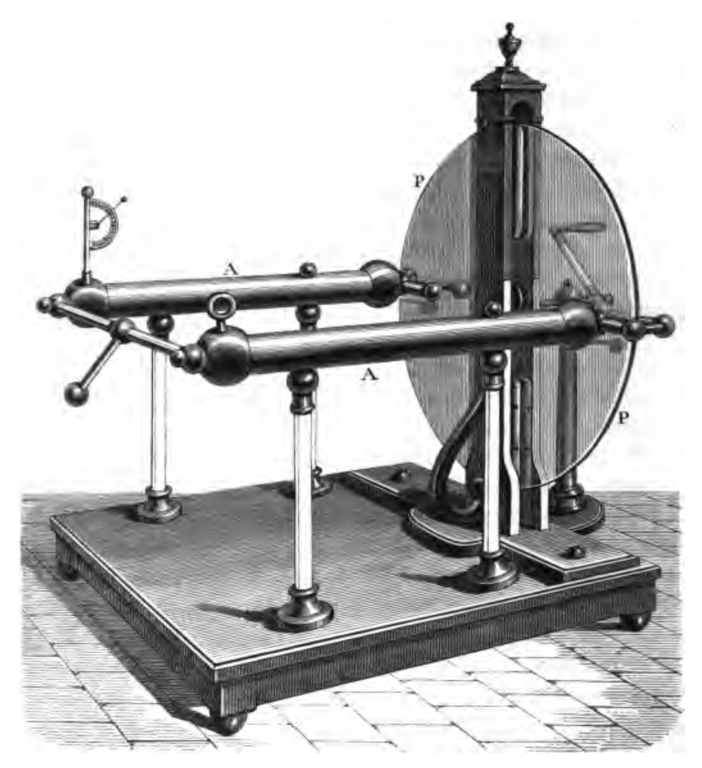


Fig. 254. — Machine électrique.

friction de la main. Après divers perfectionnements, la machine électrique prit enfin la forme ci-dessus, qui est celle sous laquelle on la trouve dans tous les cabinets de physique.

La pièce principale de cette machine est un *plateau* de verre PP, d'un mètre de diamètre et même plus dans les fortes machines.

Ce plateau est fixé à un axe horizontal qu'on fait tourner à l'aide d'une manivelle. Cet axe est lui-même supporté par deux montants de bois, qui portent quatre coussins ou *frottoirs*, deux à leur partie supérieure, et deux à leur partie inférieure. Ces coussins sont en cuir rembourré de crin, et c'est leur frottement contre le plateau de verre, lorsqu'il tourne, qui l'électrise sur ses deux faces. Enfin, la même table qui porte le plateau porte deux longs cylindres de laiton AA, qu'on nomme les *conducteurs*. Ceux-ci, qui sont isolés sur quatre pieds de verre, sont réunis entre eux par un tube de laiton, à leurs extrémités opposées au plateau de verre, tandis que les extrémités voisines de ce dernier sont terminées chacune par des *peignes* ou *mâchoires*. On donne ce nom à quatre tubes de cuivre accouplés deux à deux, de manière à embrasser les bords opposés du plateau suivant un même diamètre horizontal. Ces peignes sont ainsi nommés, parce que du côté qui regarde le verre, ils sont armés d'une série de petites pointes destinées à donner écoulement à l'électricité, comme on va le voir ci-après.

Ces détails connus, voici comment la machine électrique donne naissance à un abondant dégagement de fluide positif : lorsqu'on imprime un mouvement de rotation rapide au plateau, celui-ci, par l'effet du frottement, s'electrise positivement, et en même temps les coussins s'électrisent négativement. Or, tandis que l'électricité négative de ces derniers s'écoule dans le sol par les montants de bois et par des bandes d'étain collées dessus, l'électricité positive du plateau, qui ne peut se dégager, reste sur le verre; là, agissant par influence sur les peignes et sur les conducteurs, elle en décompose le fluide naturel, et soutire le fluide négatif, qui s'écoule par les pointes des peignes et va neutraliser le fluide positif du verre. Les conducteurs perdant ainsi leur électricité négative, ils deviennent une source puissante d'électricité positive tant que le plateau tourne.

Telle qu'elle vient d'être décrite, la machine électrique ne fournit essentiellement que du fluide positif; mais on peut la disposer de manière à lui faire donner du fluide négatif. Pour cela, on isole les quatre pieds de la table sur des plaques épaisses de résine, de verre ou de soufre, et on fait communiquer les conduc-

teurs avec le sol au moyen d'une chaîne métallique. Celle-ci donne alors écoulement à l'électricité positive des conducteurs, tandis que l'électricité négative des coussins, ne pouvant se dégager, s'accumule sur la table et sur les montants de bois.

352. **Mesure de la charge de la machine électrique, causes qui la font varier.** — Pour apprécier le degré de charge de la machine électrique, on fixe dessus un petit appareil appelé *électromètre à cadran* ou *électromètre de Henley*, du nom de son inventeur. Représenté sur l'un des conducteurs de la machine ci-dessus, à l'extrémité opposée au plateau, cet électromètre se compose d'une petite colonne de bois à laquelle est adapté un cadran d'ivoire divisé en 180 degrés. Au centre de ce cadran est un axe horizontal auquel est fixée une aiguille légère, en fanon de baleine, portant à son extrémité inférieure une boule de moelle de sureau. Cela posé, à mesure que les conducteurs se chargent, l'électricité se répand sur la colonne de bois et sur l'aiguille, et celle-ci, qui était d'abord verticale, est repoussée et diverge d'autant plus que la machine est plus chargée.

Une fois que les conducteurs sont électrisés, si l'on cesse de tourner le plateau, et que l'air soit sec, on voit l'électromètre continuer à diverger et la boule ne s'abaisser que très-lentement, ce qui indique que les conducteurs ne subissent qu'une déperdition lente dans l'air sec. Par un temps humide, au contraire, l'électromètre retombe aussitôt qu'on cesse de tourner, ce qui prouve combien est abondante la déperdition de l'électricité par les vapeurs contenues dans l'air. C'est pour cette raison que, pendant les temps humides et pluvieux, toutes les expériences avec la machine électrique ne réussissent que difficilement. Il faut alors la dessécher avec soin en plaçant sur la table un réchaud, et essuyer les pieds de verre et le plateau avec des linges chauds.

On augmente beaucoup le dégagement d'électricité de la machine en appliquant sur les coussins une légère couche d'*or mussif* ; on nomme ainsi une matière friable, jaunâtre, qui est un composé de soufre et d'étain. On emploie encore différents amalgames d'étain, de zinc et de mercure, lesquels produisent même des effets plus énergiques que l'or mussif, mais moins durables.

Quels que soient les moyens qu'on emploie pour activer le déga-

gement d'électricité et pour éviter les causes de déperdition, il ne faudrait pas croire qu'en continuant à tourner indéfiniment le plateau de la machine, on pût accumuler sur les conducteurs une quantité illimitée d'électricité. Celle-ci augmente d'abord rapidement, mais la tension croissant en même temps, il arrive bientôt que l'effort que fait le fluide électrique pour se dégager l'emporte sur la résistance de l'air et des pieds de verre des conducteurs. A partir de ce moment, il se produit une perte d'électricité égale

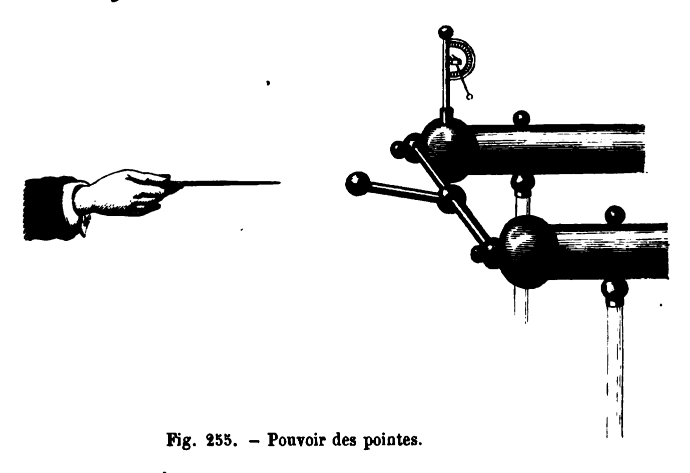


Fig. 255. – Pouvoir des pointes.

à celle qui est développée par le frottement, et, par suite, la tension ne peut dépasser la limite qu'elle a atteinte, ce qu'indique l'électromètre dont l'aiguille reste stationnaire, quoique l'on continue à tourner le plateau de la machine.

Enfin, si l'on veut obtenir d'une machine électrique tout l'effet possible, il importe de ne pas la placer trop près des murailles, des meubles, en un mot, de tous les objets sur lesquels elle pourrait agir par influence, surtout si ces objets sont anguleux, parce qu'elle en soutire alors l'électricité négative, et tend ainsi constamment à revenir à l'état neutre. Par exemple, approchez de la machine fortement chargée une pointe métallique, comme le montre la figure 255, vous verrez aussitôt, même étant encore loin du conducteur, l'électromètre retomber; ce qui s'explique évidemment

par l'électricité négative qui s'écoulant de la pointe va se recombiner avec l'électricité positive de la machine. On dit quelquefois que les pointes soutirent l'électricité; c'est une fausse manière de s'exprimer : les pointes ne soutirent rien, mais, sous l'influence d'un corps électrisé, elles lui cèdent une électricité contraire à la sienne, ce qui produit le même effet.

353. **Électrophore.** — L'*électrophore* (producteur d'électricité) est un appareil fort simple, dû à Volta, à l'aide duquel on obtient des quantités considérables d'électricité. Il se compose de deux pièces : un gâteau de résine coulé sur un plateau de bois, et un disque de bois à manche de verre, recouvert d'étain sur toute sa



Fig. 256. — Électrophore.

surface. Pour en obtenir de l'électricité, on commence par battre le gâteau de résine avec une peau de chat, comme le montre la figure 256. Puis, lorsqu'il a été ainsi électrisé négativement, on applique dessus le disque de bois à manche de verre. L'électricité

négative agissant alors sur lui par influence, attire sur la face d'étain inférieure le fluide positif, et repousse sur la face supérieure le fluide négatif. Si, en cet état, on pose le doigt dessus, comme le montre la figure 257, l'électricité négative s'écoule dans le sol, et le disque recouvert d'étain ne conserve que de l'électricité positive. Par suite, en l'enlevant d'une main par le manche de verre, et en approchant l'autre main (fig. 258), on tire une forte étincelle due à la recomposition du fluide positif du disque avec le fluide négatif de la main.

Replaçant maintenant le disque sur le gâteau de résine, celle-ci exerce la même action par influence que tout à l'heure, et si l'on

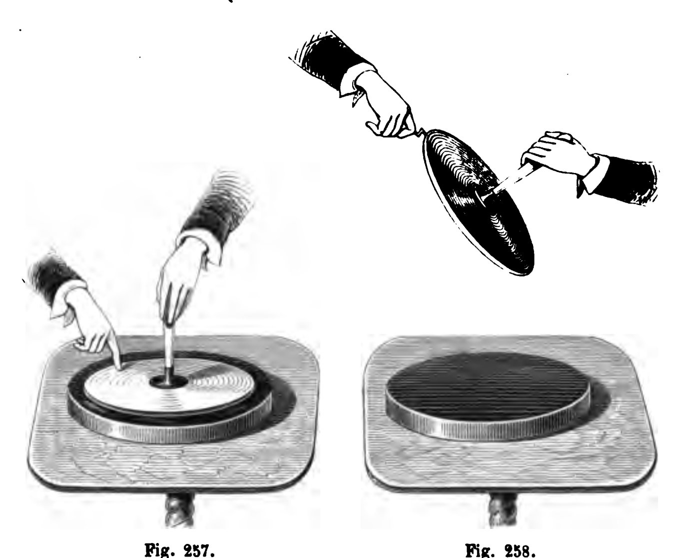


Fig. 257. Fig. 258.

Étincelle tirée de l'électrophore.

continue à manœuvrer comme il est indiqué dans les figures 257 et 258, on peut obtenir successivement des étincelles pendant des mois entiers, si l'air est sec, sans qu'il soit nécessaire de battre de nouveau la résine avec la peau de chat. Néanmoins, il faut avoir bien soin, avant d'enlever le disque, de le toucher chaque fois avec le

doigt (fig. 258), sinon, conservant son électricité négative, il revient à l'état neutre aussitôt qu'on l'éloigne de la résine.

354. **Électromètre à feuilles d'or.** — L'*électromètre à feuilles d'or*, autrement dit *électromètre de Bennet*, du nom de son inventeur, est un petit appareil très-sensible pour reconnaître si un corps est électrisé et quelle est l'espèce d'électricité qu'il possède. Cet appareil se compose d'un bocal de verre dont le goulot est fermé par un bouchon de liége; dans celui-ci est fixée une tige de cuivre terminée à sa partie supérieure par une boule de même métal, et à sa partie inférieure par deux petites feuilles d'or extrêmement légères (fig. 259). Enfin, le bouchon de liége, le goulot et tout le haut du bocal sont recouverts d'une couche de cire d'Espagne, qu'on a fait dissoudre dans l'alcool et étendue ensuite avec un pinceau. Cette préparation, qui est employée fréquemment dans les appareils électriques, est nécessaire pour rendre le verre un isoloir parfait. Cette substance, en effet, conduit très-mal, par elle-même, le fluide électrique, mais elle est très-hygrométrique, c'est-à-dire qu'elle attire naturellement la vapeur d'eau qui est dans l'air, et se couvre ainsi d'une couche d'humidité qui rend sa surface conductrice. Couvert d'un vernis quelconque, le verre ne présente plus cet inconvénient, parce que les vernis, qui sont tous résineux, ne sont pas hygrométriques et ne conduisent pas l'électricité.

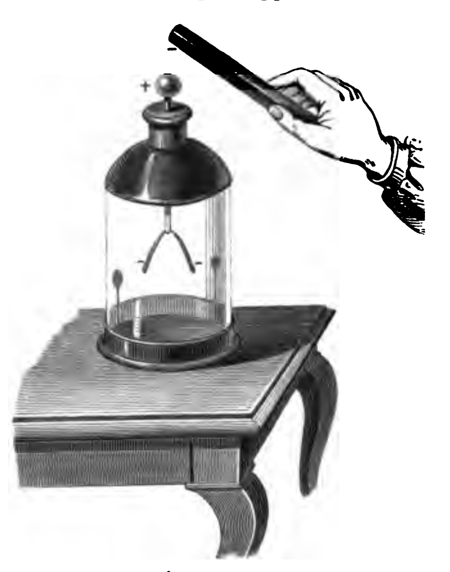


Fig. 259. — Électromètre à feuilles d'or.

Cela posé, l'appareil que nous venons de décrire permet de

reconnaître facilement si un corps contient une quantité d'électricité, même assez faible, et si elle est positive ou négative. En effet, dès qu'on approche un corps électrisé, négativement par exemple, comme le représente la figure ci-contre, son électricité, agissant par influence sur la boule et sur la tige, attire l'électricité positive dans la boule et repousse en bas l'électricité négative. Les deux feuilles d'or se trouvent donc chargées de la même électricité; or, comme elles sont très-légères et très-mobiles, elles divergent pour des quantités très-faibles de fluide.

Si l'on veut reconnaître l'espèce d'électricité dont est chargé le corps qu'on a présenté à l'électromètre, tandis que celui-ci est sous son influence, on pose le doigt sur la boule. D'après ce qui a été dit précédemment (350), on enlève alors le fluide de même nom que celui du corps. Retirant donc le doigt d'abord, puis ensuite le corps électrisé qu'on tenait près de la boule, l'appareil reste chargé d'électricité, car on voit les feuilles d'or diverger, et cette électricité est contraire à celle du corps sur lequel on expérimente. Cela posé, on approche enfin avec lenteur un corps chargé d'une électricité connue, par exemple un tube de verre électrisé positivement : si, à l'approche de celui-ci, on voit les feuilles d'or diverger davantage, c'est un signe que l'électricité restée dans l'appareil est repoussée par celle du verre, et que, par suite, elle est positive. Donc le corps qu'on a présenté à l'électromètre était électrisé négativement. Si, au contraire, la divergence des feuilles d'or diminue à l'approche du tube de verre, cela indique que leur électricité est négative, et que, dans ce cas, le corps soumis à l'expérience était électrisé positivement.

CHAPITRE III

RÉCRÉATIONS ÉLECTRIQUES.

355. **Etincelle électrique.** — Dans le siècle dernier, à une époque où les phénomènes électriques avaient encore tout l'attrait de la nouveauté, les physiciens se plaisaient à donner, sous des formes

variées, ces mêmes phénomènes en spectacle à la foule. Franklin lui-même, dont nous aurons à citer bientôt les importantes découvertes, Franklin, qui fut membre correspondant de l'Académie des sciences de Paris, ambassadeur à la cour de France, membre du Conseil exécutif suprême de Philadelphie, aimait à se livrer à ces récréations électriques. « La Bibliothèque de Philadelphie, écrit-il



Fig. 260. — Étincelle tirée de la machine électrique.

dans ses lettres sur l'électricité, ayant reçu en présent, de Londres, un tube de verre, avec quelques instructions sur son usage, je saisis avec joie l'occasion de répéter les expériences que j'avais vu faire peu auparavant, à Boston, par le docteur Spence, récemment arrivé d'Écosse. A force de pratique, j'acquis une grande facilité dans ces exercices, ajoutant de temps à autre de nouvelles expériences à celles dont le compte-rendu nous était venu d'Angleterre. Je dis à force de pratique, ajoute-t-il, car ma maison ne désemplissait pas de gens avides de voir ces merveilles. Pour

alléger un peu ma besogne, je fis faire plusieurs tubes semblables à notre verrerie, desquels nos amis se servirent ; et nous eûmes ainsi plusieurs démonstrateurs. » Or, Franklin avait alors 43 ans. « Le sujet, dit-il, était tout à fait neuf pour moi ; » ce qui ne con-



Fig. 261. — Tabouret électrique.

tribua pas peu, sans doute, au vif intérêt que cette étude lui inspira et aux succès rapides qu'il y obtint.

Une des premières expériences que se plaisent à répéter les personnes qui voient pour la première fois fonctionner une machine électrique, c'est d'en approcher la main pour en tirer des étincelles, comme le représente la figure 260, étincelles qui sont accompagnées d'une piqûre et d'une commotion d'autant plus vives que la machine est plus puissante.

Ces étincelles proviennent de la combinaison des deux fluides

contraires par suite d'une électrisation par influence. En effet, le fluide positif de la machine agissant à distance sur le fluide naturel de la main, pour le décomposer, repousse dans le sol le fluide positif et attire le fluide négatif. Or, lorsque l'attraction mutuelle des électricités contraires de la machine et de la main l'emporte sur la résistance de l'air, les deux fluides font explosion pour se réunir avec un bruit sec et une vive lumière qui constituent l'étincelle électrique. Quand une machine électrique est puissante, les étincelles qu'on en tire affectent la forme en zigzag de l'éclair dans les nuées orageuses.

356. **Tabouret électrique.** — C'est surtout lorsqu'on tire du

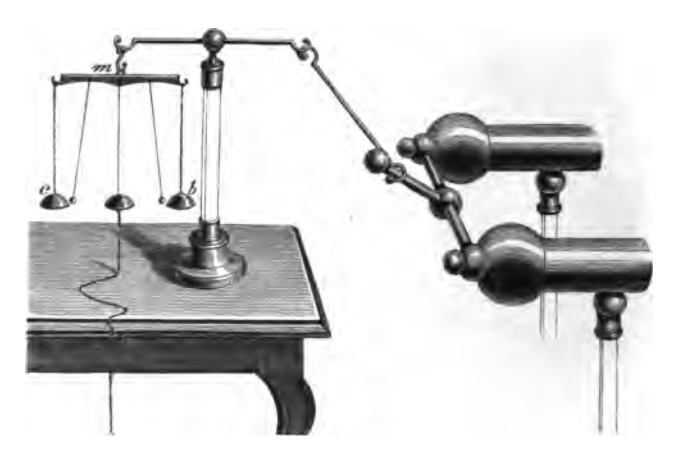


Fig. 262. — Carillon électrique.

corps humain l'étincelle électrique, qu'elle présente un aspect curieux. Pour cela, une personne étant montée sur un tabouret à pied de verre qui l'isole, elle pose la main sur l'un des conducteurs de la machine électrique (fig. 261). Si l'on fait alors tourner le plateau, le corps humain étant bon conducteur de l'électricité, la personne isolée se charge d'électricité comme les conducteurs, sans ressentir aucun effet qu'un léger souffle sur la figure et sur les mains. Or, si alors une seconde personne touche la main de celle

qui est sur le tabouret, elle en tire les mêmes étincelles que de la machine.

357. **Carillon électrique.** — Le *carillon électrique* est une sonnerie qu'on fait marcher au moyen d'attractions et de répulsions électriques. Elle se compose de trois timbres métalliques suspendus à une tringle horizontale de cuivre, qu'on met en communication avec la machine électrique (fig. 262). Les deux timbres *b* et *c* sont suspendus par des cordes métalliques; mais celui du milieu est

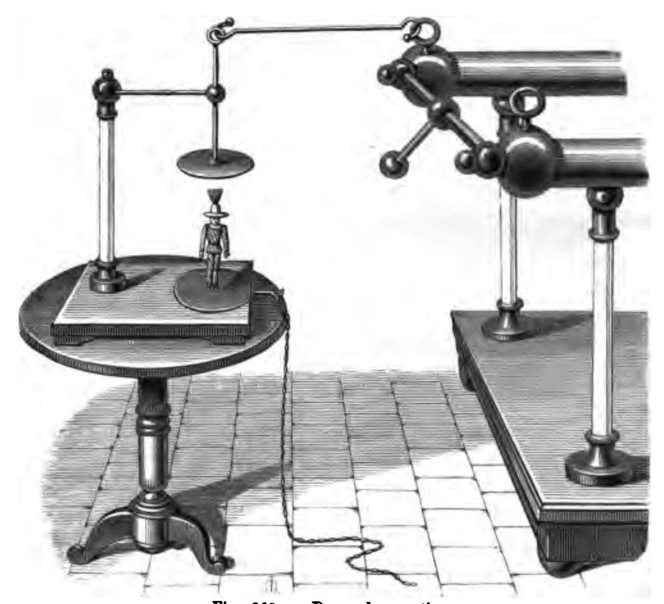


Fig. 263. — Danse des pantins.

soutenu par un cordon de soie, et, de plus, il est mis en communication avec le sol par une chaîne. Entre les timbres sont suspendues deux petites boules de cuivre isolées par des fils de soie auxquels elles sont attachées. Or, aussitôt que la machine se charge, l'électricité passant sur les timbres *b* et *c*, ceux-ci attirent les boules de cuivre qui viennent les frapper; mais repoussées aussitôt, elles vont frapper le timbre du milieu sur lequel elles perdent

l'électricité qu'elles ont prise aux deux autres. Elles sont alors attirées de nouveau, puis repoussées, et ainsi de suite tant qu'on tourne le plateau de la machine : d'où résulte le carillon électrique.

358. **Danse des pantins.** — La ***danse des pantins*** ou ***théâtre électrique*** est, comme le carillon, une application des attractions et des répulsions des corps électrisés. Cette expérience consiste à placer un petit pantin très-léger, en moelle de sureau, entre deux disques métalliques communiquant l'un avec le sol au moyen d'une chaîne, et l'autre avec la machine électrique (fig. 263). Aussitôt que celle-ci se charge, on voit le petit pantin successivement attiré et repoussé de l'un à l'autre, comme s'il exécutait de lui-même une série de sauts avec une grande agilité, ce qui amuse toujours beaucoup ceux qui sont témoins de cette expérience.

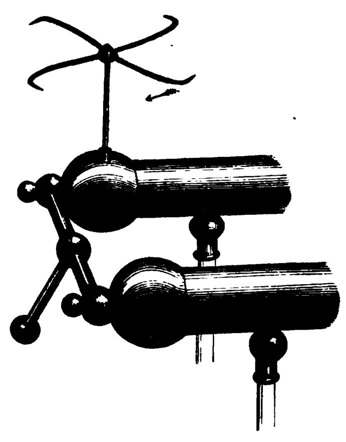


Fig. 264. — Tourniquet électrique.

359. **Tourniquet électrique.** — Le ***tourniquet électrique*** est un petit appareil fondé sur le pouvoir des pointes (349). Il se compose de quatre à cinq branches de cuivre horizontales, toutes recourbées dans le même sens (fig. 264). Ces branches, qui sont terminées en pointe, sont toutes fixées à une chape commune qui repose sur un pivot de cuivre. En plaçant cet appareil sur la machine, aussitôt qu'elle se charge, on voit le tourniquet prendre un mouvement de rotation rapide dans le sens marqué par la flèche. Ce mouvement est dû à l'écoulement du fluide électrique qui se dégage par les pointes. Or, comme ce petit appareil ne marche pas dans le vide, mais seulement dans l'air, cela prouve qu'il ne faut point expliquer son mouvement par un effet de réaction analogue à celui qui a lieu dans le tourniquet hydraulique (71), mais par un effet de répulsion entre l'électricité des pointes et celle qu'elles communiquent à l'air en se déchargeant.

360. **Œuf électrique.** — L'*œuf électrique* est une expérience de lumière électrique dans le vide ; elle se fait dans un globe de verre rond ou ovoïde, muni de deux tiges de cuivre à bouton, communiquant l'une avec la machine électrique, l'autre avec le sol. Enfin, dans le pied de l'appareil est un robinet qui peut se visser

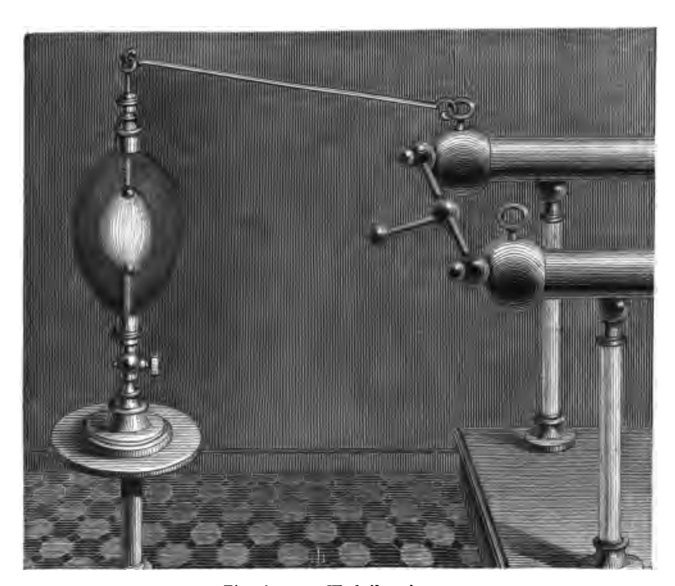


Fig. 265. — Œuf électrique.

sur la machine pneumatique. Cela posé, ayant fait le vide dans le globe, on le dispose comme le représente la figure 265, puis on fait marcher la machine électrique. Si l'expérience est faite dans l'obscurité, on voit alors une belle lueur violacée se répandre en jet continu de la boule supérieure à la boule inférieure. Cette lumière est due à l'électricité de la machine qui, n'étant pas retenue par la résistance de l'air, s'écoule vers le sol.

361. **Carreau magique.** — Le *carreau magique* se compose d'un carreau de verre dont l'une des faces est recouverte en partie d'une longue bande d'étain, repliée plusieurs fois sur elle-même

de manière à former une série de traits métalliques, parallèles et très-rapprochés. Le carreau étant soutenu verticalement sur deux pieds de verre, le bout supérieur de la bande d'étain est mis en communication avec la machine électrique par un conducteur, et le bout inférieur avec le sol au moyen d'un cordon métallique.

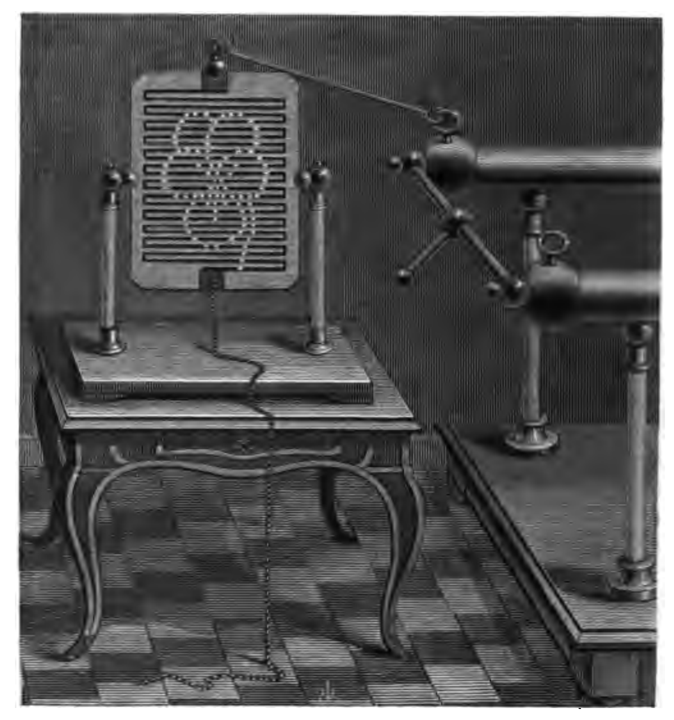


Fig. 266. — Carreau magique.

Dans cet état, si l'on fait marcher la machine, l'électricité s'écoulera par la bande d'étain sans aucune étincelle; mais si préalablement on pratique avec un canif, dans la bande d'étain, de légères solutions de continuité, une étincelle apparaîtra ensuite à chacune d'elles; et si l'on a disposé les découpures de manière à représenter un objet déterminé, une fleur, un monument, des mots, on voit

ces objets se reproduire en traits de feu tant qu'on fait marcher la machine électrique (fig. 266). Cette expérience est une conséquence de la prodigieuse vitesse avec laquelle le fluide électrique se propage, vitesse qu'on a constatée être d'environ 170 000 kilomètres par seconde. Il en résulte que, quoique dans l'expérience ci-dessus les étincelles soient en réalité successives, elles paraissent toutes simultanées.

362. **Canon de Volta.** — Le *canon de Volta* n'est pas seule-



Fig. 267. — Canon de Volta.

ment une récréation électrique, c'est aussi une expérience qui démontre un fait scientifique important, savoir : que l'étincelle électrique peut déterminer des réactions chimiques. Par exemple, l'eau étant formée de deux gaz, l'hydrogène et l'oxygène, dans le rapport de deux volumes du premier pour un volume du second, si l'on mélange ces deux gaz dans ce même rapport, et qu'on fasse passer dans le mélange une étincelle électrique, instantanément les deux gaz se combinent pour faire de l'eau. De plus, cette combinaison est accompagnée d'une vive lumière et d'une forte détonation, cette dernière étant due à la force expansive de la vapeur

d'eau qui se produit à une température très-élevée au moment de la combinaison.

C'est sur cette propriété des mélanges qui détonnent ainsi par l'étincelle électrique qu'est fondé le *canon de Volta*, représenté dans la figure 267. C'est un petit canon de cuivre, isolé sur un pied de verre. Dans la lumière du canon est un tube de verre, et dans ce tube une tige de cuivre terminée, au bout extérieur, par une petite boule de même métal, et, de l'autre, approchant très-près de la paroi intérieure du canon, mais sans la toucher. Cela posé, ayant introduit un mélange de deux parties d'hydrogène et d'une partie d'oxygène dans le canon, on ferme celui-ci hermétiquement avec un bouchon, puis on le fait communiquer avec le sol au moyen d'une chaîne métallique. Approchant alors le disque de l'électrophore, l'étincelle jaillit sur la petite boule, et en même temps dans l'intérieur du canon. Or, c'est cette étincelle intérieure qui détermine la combinaison des deux gaz avec une violente explosion qui lance au loin le bouchon.

Sous le nom de *pistolet de Volta*, on construit aussi un petit appareil en fer-blanc dans lequel on fait détonner un mélange d'oxygène et d'hydrogène, ou d'air et d'hydrogène; pour cela, on le tient à la main et on en présente le bouton à la machine électrique.

CHAPITRE IV

CONDENSATION DE L'ÉLECTRICITÉ.

363. **Condensateur électrique.** — On nomme *condensateurs* des appareils qui servent à accumuler les fluides électriques. Ils ont reçu des formes assez variées, mais tous sont essentiellement composés de deux corps conducteurs séparés par une substance isolante. Leur théorie, fondée sur l'électrisation par influence (350), se démontre ordinairement avec le *condensateur d'Œpinus*, ainsi appelé du nom de son inventeur, physicien de l'Académie de Saint-Pétersbourg, mort en Livonie en 1802.

Cet appareil se compose de deux plateaux métalliques A et B

isolés sur des pieds de verre (fig. 268); entre eux est un carreau de verre ordinaire C, d'un diamètre plus grand que celui des deux plateaux de 10 centimètres environ. Le pied du carreau de verre est fixe, mais ceux des deux plateaux glissent sur une règle de cuivre, de manière à pouvoir être approchés l'un de l'autre jusqu'à ce qu'ils touchent le verre.

Cela posé, les deux plateaux étant mis en contact avec le carreau de verre, comme le représente la figure 269, on met l'un d'eux

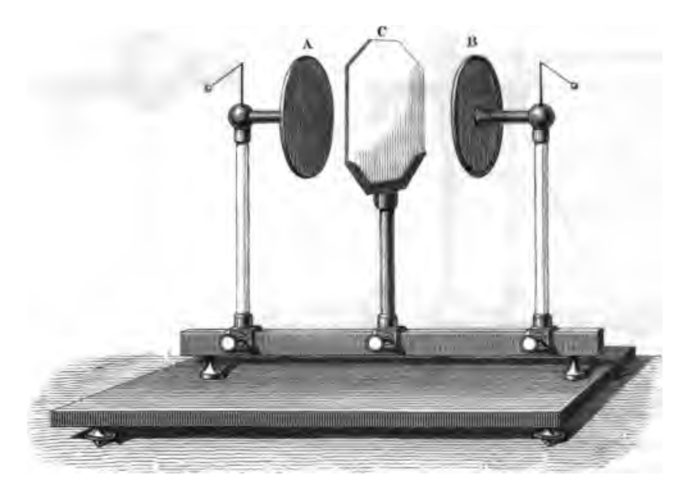


Fig. 268. — Condensateur d'Œpinus.

en communication avec la machine électrique, et l'autre avec le sol au moyen de cordons métalliques. Mettant alors la machine en activité, le plateau B s'électrise positivement, et s'il était seul, il prendrait, à surface égale, la même quantité d'électricité qu'elle; mais la présence du plateau A modifie complétement la distribution de l'électricité, et on va voir que c'est lui qui est la cause de son accumulation. En effet, le fluide positif du plateau B, agissant par influence au travers du verre sur le plateau A, repousse dans le sol le fluide de même nom et attire le fluide négatif. Or, ce dernier ainsi attiré sur le plateau A réagit à son tour sur le fluide contraire

du plateau B et le neutralise, mais en partie seulement, à cause de l'intervalle qui les sépare. L'électricité du disque B se trouvant donc en grande partie neutralisée, sa tension ne fait plus équilibre à la tension qui a lieu sur la machine, et, par suite, celle-ci fournit au plateau B une nouvelle quantité de fluide positif, lequel, agissant comme la première fois, attire de nouveau du fluide négatif sur le plateau A; en sorte qu'il se produit ainsi progressivement

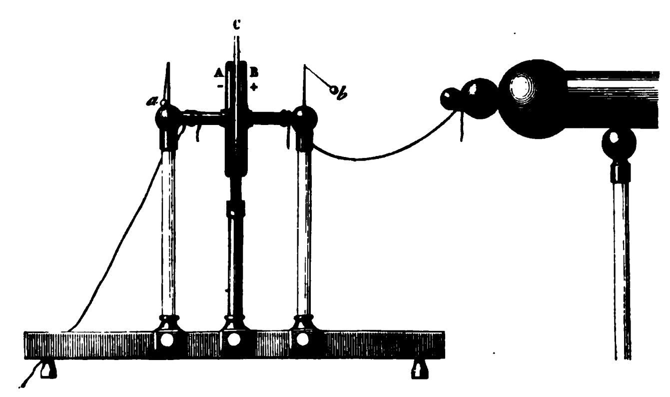


Fig. 269. — Charge du condensateur.

une grande accumulation d'électricités contraires sur chacun des plateaux B et A.

Lorsque l'appareil est fortement chargé, on supprime d'abord la communication avec le sol et ensuite celle avec la machine, en enlevant les deux cordons métalliques. A cet état, les deux électricités sont en présence sur les plateaux A et B, sans pouvoir se réunir, mais sans manifester aucun phénomène électrique, car leurs actions contraires tendant à se contre-balancer, elles se neutralisent mutuellement; ce qu'on exprime en disant qu'elles sont ***dissimulées***. Toutefois, la dissimulation n'est pas complète, car le plateau ***collecteur***, c'est-à-dire celui qui est en communication avec la machine électrique, contient toujours un excès d'électricité libre, comme l'indique la divergence d'un pendule *b* placé sur son support. Un pendule semblable fixé sur le pied de l'autre plateau

ne donne aucun signe d'électricité, du moins tant que les plateaux sont en contact avec le carreau de verre; mais si on les écarte, comme le représente la figure 268, on voit les pendules diverger; car maintenant les deux électricités ne se neutralisent plus. Les plateaux étant ainsi écartés, il est facile de vérifier qu'ils sont électrisés, l'un positivement, l'autre négativement. En effet, si un tube de verre frotté est présenté au pendule du plateau B, ce pendule est repoussé; ce qui montre qu'il possède la même électricité que le verre; tandis que le même tube de verre étant approché de l'autre pendule, il y a attraction.

364. **Décharge lente et décharge instantanée du condensateur; excitateur.** — Le condensateur étant chargé et disposé comme dans la figure 269, mais les cordons métalliques étant enlevés, on peut le ***décharger***, c'est-à-dire le ramener à l'état neutre, soit par des contacts successifs, et alors on a la ***décharge lente;*** soit en mettant les deux plateaux en communication par un conducteur, et la décharge est alors ***instantanée***.

Si l'on touchait d'abord le plateau A, on n'en recueillerait aucune quantité d'électricité, puisque toute celle qu'il contient est neutralisée par l'électricité contraire du plateau B. Mais il n'en est plus ainsi lorsqu'on touche ce dernier : on lui enlève toute son électricité libre, c'est-à-dire toute celle qui n'est pas neutralisée par le plateau A, et c'est alors sur celui-ci que se trouve une certaine quantité d'électricité non neutralisée. On le reconnaît en ce que le pendule *b* retombant, c'est le pendule *a* qui se met à diverger. En continuant à toucher ainsi alternativement les deux plateaux, on finirait par les décharger tout à fait, mais, par un temps sec, il faudrait plusieurs heures.

Pour obtenir une décharge instantanée, il suffirait de poser une main sur un des plateaux, et de toucher le deuxième avec l'autre main; mais on éprouverait alors une violente commotion tout à fait différente de celle que donne l'étincelle de la machine électrique. On évite cette commotion en faisant usage de l'***excitateur***. On nomme ainsi un arc métallique terminé par deux boules à ses extrémités, et à charnière en son milieu, de manière à se replier sur lui-même. Tenant cet arc à la main, comme le représente la figure 271 ci-après, on fait toucher l'une des boules à un des pla-

teaux du condensateur; et on replie l'arc sur sa charnière, jusqu'à ce que la seconde boule vienne toucher l'autre plateau. A l'instant où cette boule est près de le toucher, il part une forte étincelle, due à la réunion des électricités contraires accumulées sur le condensateur; mais ici on ne ressent aucune commotion, la recombinaison ne se faisant plus par les bras et le corps de l'expérimentateur, mais par l'arc métallique, qui est meilleur conducteur.

365. **Limite de charge du condensateur.** — Deux causes limitent la quantité d'électricité qui peut s'accumuler sur le condensateur. La première, c'est que celle qui n'est point neutralisée sur le plateau collecteur B (fig. 269) augmentant avec la charge électrique, il arrive un moment où la tension sur ce plateau égale celle de la machine, et alors celle-ci ne peut plus lui céder d'électricité. La seconde cause résulte de ce que la tendance des deux électricités contraires à se réunir augmentant avec l'accumulation sur les plateaux, cet effort finit par l'emporter sur la résistance du carreau de verre; alors il est troué, et les deux fluides se recombinent à travers.

366. **Bouteille de Leyde.** — La *bouteille de Leyde*, ainsi nommée du nom de la ville où elle fut inventée, est un condensateur qui ne diffère que par la forme de celui qui vient d'être décrit. Elle fut trouvée par hasard, en 1746, par Musschenbroek, physicien hollandais. Voulant électriser de l'eau renfermée dans une bouteille, il avait passé dans le bouchon une tige métallique, puis il présenta celle-ci à la machine électrique. Or, à mesure que le liquide s'emparait de l'électricité de la machine, il agissait par influence, au travers des parois de la bouteille, sur la main de l'expérimentateur, et y attirait le fluide contraire. L'électricité s'accumulant ainsi à l'intérieur et à l'extérieur de la bouteille, il arriva que lorsque Musschenbroek, la tenant toujours d'une main, vint à toucher la tige de cuivre avec l'autre main, il reçut dans les bras et dans la poitrine un coup si violent qu'après deux jours il était à peine remis de la commotion et du malaise qu'il avait ressentis; et il écrivait à Paris, au physicien Réaumur, qu'il ne recommencerait pas cette expérience quand on lui donnerait le royaume de France.

Mais le fait découvert par Musschenbroek eut un trop grand retentissement pour ne pas trouver des imitateurs nombreux. Mal-

gré les récits effrayants, chacun voulut recevoir la commotion, et quoiqu'on ne se rendît pas compte encore de la théorie de la bouteille de Musschenbroek, ou ***bouteille de Leyde***, comme on l'appela, on parvint promptement à lui donner la meilleure disposition pour en obtenir le plus grand effet possible ; l'Anglais Bevis appliqua à l'extérieur une feuille d'étain, et l'abbé Nollet, professeur de

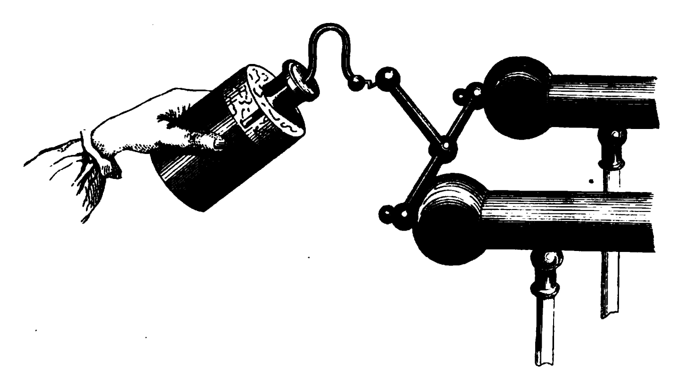


Fig. 270. — Charge de la bouteille de Leyde.

physique à Paris, remplaça l'eau par des feuilles de métal battu remplissant l'intérieur de la bouteille. Celle-ci prit donc dès lors la forme qu'on lui donne encore aujourd'hui et qui est représentée dans la figure 270 : c'est un bocal de verre mince, rempli de feuilles d'or ou de cuivre battu, qu'on a soin de laisser tomber simplement les unes sur les autres sans les tasser, afin qu'elles présentent une plus grande surface. Sur la paroi extérieure est collée une feuille d'étain qui recouvre aussi le fond, mais laisse le verre à nu jusqu'à une grande distance du goulot. Enfin, dans celui-ci est un bouchon de liége traversé par une tige recourbée à l'extérieur en forme de crochet, et terminée par une petite boule qu'on nomme le ***bouton*** ; à l'intérieur, cette tige se prolonge au travers des feuilles de métal qui remplissent la bouteille. On voit donc que cet appareil est un véritable condensateur, dont la lame isolante est la paroi même de la bouteille, et dont les deux plateaux métalliques sont

l'un la feuille d'étain extérieure, et l'autre les feuilles d'or qui remplissent la bouteille.

On donne ordinairement au crochet et aux feuilles d'or le nom d'*armature intérieure*, et à la feuille d'étain celui d'*armature extérieure*. Cela posé, pour charger la bouteille, on la tient à la main, comme le représente la figure 270, et on approche le crochet d'une machine électrique en activité. Le fluide positif de celle-ci s'accumulant alors dans la bouteille, agit par influence, au travers de ses parois, sur la feuille d'étain et sur la main, pour y attirer une grande quantité de fluide négatif. La bouteille une fois chargée, on peut impunément tenir d'une main l'armature extérieure; mais il ne faudrait pas toucher en même temps, de l'autre main, le crochet, sinon on recevrait une commotion extrêmement forte, résultant de la recombinaison des deux électricités contraires par les bras et par le corps.



Fig. 271. — Décharge de la bouteille de Leyde.

C'est pourquoi, lorsqu'on veut décharger une bouteille de Leyde, on établit toujours la communication entre les deux armatures au moyen de l'excitateur, en ayant soin de l'appliquer d'abord sur l'armature extérieure qui est celle qu'on tient à la main ou qui communique avec le sol (fig. 271), sinon on reçoit la commotion. Si la bouteille était isolée sur un disque de verre ou de résine, peu importerait qu'on touchât d'abord l'armature extérieure ou l'armature intérieure.

367. **Batterie électrique.** — Une *batterie électrique* est une

réunion de plusieurs grandes bouteilles de Leyde placées dans une caisse de bois (fig. 272). Toutes les armatures intérieures communiquent entre elles par des tiges métalliques qui vont se réunir à un bouton central commun ; quant aux armatures extérieures, elles sont en communication par une feuille d'étain qui revêt le fond de la caisse, et sur laquelle elles s'appuient. Une batterie se charge comme la bouteille de Leyde ordinaire, en faisant communiquer l'armature intérieure avec la machine électrique au moyen d'une

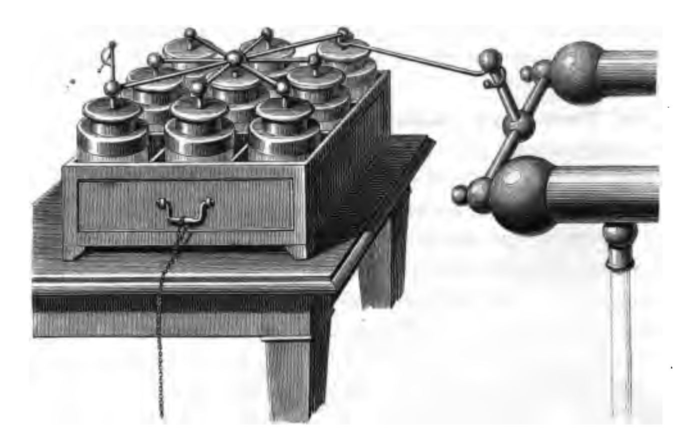


Fig. 272. — Batterie électrique.

tige métallique, et l'armature extérieure avec le sol par une chaîne.

Les bocaux qui composent une batterie prennent le nom de *jarres*. Leurs parois sont recouvertes d'étain en dedans comme en dehors, et les feuilles d'étain intérieures ne communiquent que par une petite chaîne métallique au bouton de chaque jarre. Plus celles-ci sont nombreuses et plus leurs armatures présentent de surface, plus on peut y accumuler d'électricité; mais aussi plus il faut de temps pour charger la batterie. Sur l'une des jarres on place un petit électromètre à cadran, qui sert à faire connaître le degré de charge de l'appareil; il ne prend jamais qu'une faible divergence, l'électricité qui s'accumule dans les jarres étant en

partie dissimulée par le fluide contraire attiré sur les armatures extérieures.

La batterie une fois chargée, on enlève le conducteur qui établit la communication avec la machine, en ayant soin, pour cela, de faire usage d'un crochet à manche de verre, afin d'éviter la commotion, qui pourrait occasionner des accidents graves quand la batterie présente une grande surface. On la décharge ensuite en faisant communiquer entre elles les deux armatures au moyen de l'excitateur; mais ici, au lieu de faire usage de l'excitateur simple représenté dans la figure 271, on en prend un à manche de verre, comme dans la figure 276, et on a soin de toucher d'abord l'armature extérieure.

368. **Électromètre condensateur.** — Nous terminerons l'étude des condensateurs par l'application qui en a été faite par Volta à l'électromètre à feuilles d'or. On a vu que ce dernier est un appareil très-sensible pour accuser de faibles quantités d'électricité (354); or, il acquiert une sensibilité bien plus grande lorsqu'on y ajoute deux disques ou plateaux condensateurs, comme le représentent les figures 273 et 274. Le disque inférieur est soudé à la tige *t* qui porte les feuilles d'or; le disque supérieur est muni d'un manche de verre par lequel on l'enlève à volonté. Les deux disques sont en cuivre jaune et recouverts, sur les faces qui se regardent et sur leurs bords, d'une couche de vernis isolant faisant l'office de la lame de verre dans les condensateurs précédemment décrits, mais qui, étant bien plus mince, augmente la force condensante de l'appareil.

Cela posé, pour constater des développements très-faibles d'électricité, on pose le disque à manche de verre sur le disque fixe, comme le montre la figure 273; puis, prenant le disque inférieur pour plateau collecteur, on met en contact avec lui le corps sur lequel on veut expérimenter, et en même temps on fait communiquer le disque supérieur avec le sol en posant le doigt dessus. Dans notre dessin, le corps mis en contact avec le plateau inférieur est un système de deux lames, zinc et cuivre, soudées ensemble. Or, on verra bientôt (382) que dans un pareil système, par le contact même des deux métaux, le zinc s'électrise positivement et le cuivre négativement. Ce dernier métal étant donc mis

en contact avec le plateau inférieur, lui cède de l'électricité négative, laquelle, agissant par influence au travers du vernis isolant des deux plateaux, attire sur le supérieur de l'électricité positive. Quand les électricités contraires se sont ainsi accumulées sur les plateaux, on retire d'abord le doigt qu'on avait posé sur le plateau

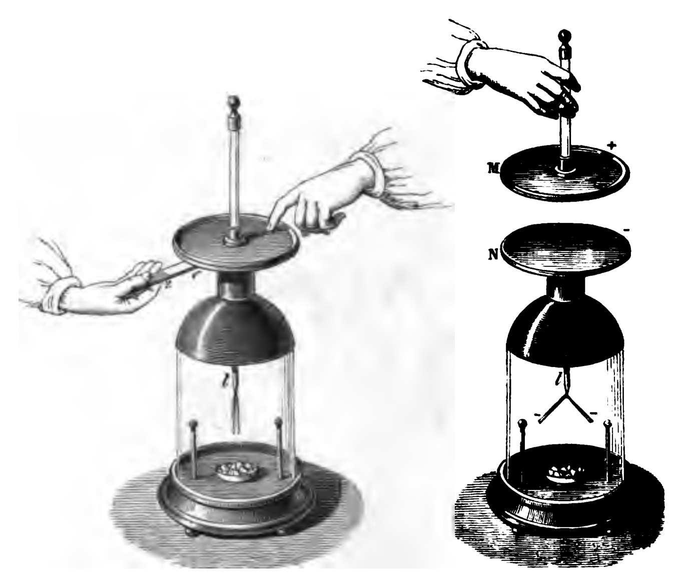


Fig. 273. Fig. 274.

Électromètre condensateur.

supérieur, puis ensuite la lame *cz*. Les feuilles d'or ne divergent pas encore, l'électricité négative du plateau inférieur étant neutralisée par l'électricité contraire du plateau supérieur; mais si l'on enlève celui-ci, comme le montre la figure 274, aussitôt une partie de l'électricité du plateau fixe passant dans la tige *t* et dans les feuilles d'or, celles-ci divergent. On constate ainsi la présence de l'électricité dans des cas où elle échapperait complétement à l'électromètre sans condensateur, représenté dans la figure 259 (page 442).

CHAPITRE V

EFFETS DIVERS DE L'ÉLECTRICITÉ ACCUMULÉE DANS LES CONDENSATEURS.

369. **Effets physiologiques.** — Les effets de l'électricité se divisent en effets physiologiques, physiques, mécaniques et chimiques. Tous



Fig. 275. — Commotion de la bouteille de Leyde.

sont d'autant plus énergiques qu'on fait usage d'appareils électriques plus puissants, comme la bouteille de Leyde et les batteries.

Les *effets physiologiques* sont ceux que produit l'électricité sur les hommes et les animaux. Ils consistent en contractions musculaires brusques, accompagnées d'une sensation plus ou moins dou-

loureuse. Lorsqu'on reçoit l'étincelle de la machine électrique, on n'éprouve qu'une légère piqûre; avec une petite bouteille la commotion se fait sentir jusque dans les coudes; avec une bouteille d'un litre, on la ressent jusque dans l'épaule; et jusque dans la poitrine, avec une bouteille plus grande.

La commotion de la bouteille de Leyde peut être donnée simultanément à un grand nombre de personnes. Pour cela, celles-ci doivent *faire la chaîne*, c'est-à-dire se donner toutes la main, comme le représente la figure 275 ; puis la personne qui est à l'un des bouts de la chaîne tenant à la main une bouteille de Leyde chargée, celle qui est à l'autre bout vient toucher le bouton de la



Fig. 276. — Animal tué par la décharge d'une batterie.

bouteille; à l'instant tout le monde reçoit la commotion avec la même intensité. L'abbé Nollet donna ainsi, en présence de Louis XV, la commotion électrique à un régiment entier.

Avec les batteries, la commotion n'est plus supportable, et l'on s'exposerait à des accidents graves en recevant la décharge d'une

batterie composée seulement de six jarres de moyenne grandeur. Avec des batteries plus puissantes on peut tuer des chats, des chiens et même des animaux plus forts. La figure 276 représente un chien tué par la décharge d'une batterie de neuf bocaux. Le collier, qui est métallique, est d'abord mis en communication avec l'armature extérieure, puis appuyant le bouton de l'une des branches d'un excitateur à manches de verre sur la partie postérieure de la colonne vertébrale, on approche le bouton de l'autre branche vers l'armature intérieure, et à l'instant où l'étincelle jaillit, l'animal est foudroyé.

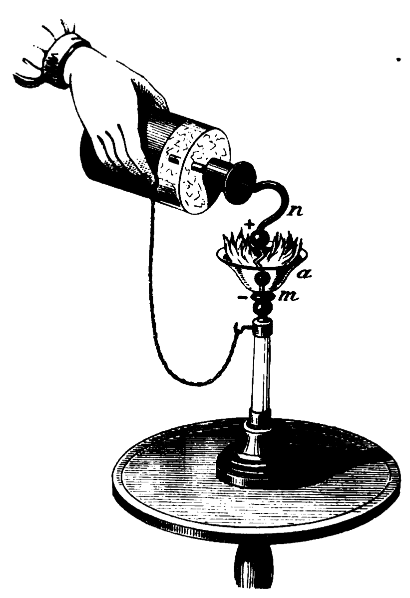


Fig. 277. — Effet calorifique de l'électricité.

On cite au musée de Teyler, à Harlem, en Hollande, une batterie présentant 58 mètres carrés d'armature, dont la décharge, qui a quelque chose d'effrayant, est capable de tuer un bœuf. Le Conservatoire des arts et métiers de Paris, possède aussi une batterie très-puissante qui lui a été léguée par le physicien Charles.

370. **Effets physiques.** — Les effets physiques de l'électricité consistent en effets lumineux et en effets calorifiques. Nous avons déjà fait connaître les premiers en décrivant l'œuf électrique et le carreau magique (fig. 265 et 266). Quant aux effets calorifiques, ils sont assez intenses non-seulement pour enflammer l'éther, la poudre à canon, la résine pulvérisée, mais pour fondre et volatiliser les métaux.

La figure 277 représente l'expérience de l'inflammation de l'éther. On verse ce liquide dans un vase de verre dont le fond est traversé par une petite tige de cuivre terminée par un bouton, et communiquant en dessous avec une chaîne qu'on met en contact avec l'armature extérieure d'une bouteille de Leyde chargée; puis on approche le bouton de la bouteille de celui qui est dans le vase et au-dessus duquel doit s'élever un peu le liquide. Or, à l'instant où jaillit l'étincelle, on voit l'éther s'enflammer. Du reste, il n'est

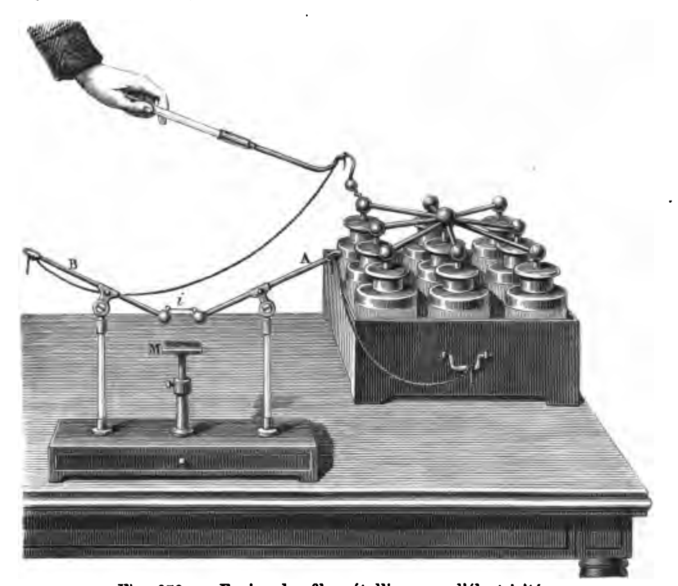


Fig. 278. — Fusion des fils métallique par l'électricité.

pas besoin d'une étincelle aussi intense que celle de la bouteille de Leyde pour faire cette expérience; elle réussit très-bien avec l'étincelle de la machine électrique. On peut même la rendre plus curieuse en montant sur le tabouret électrique, comme dans la figure 261, et en enflammant le liquide au moyen de l'étincelle qui s'échappe du doigt. Un physicien anglais causa même ainsi une grande surprise en enflammant l'éther par une étincelle tirée d'un morceau de glace qu'il tenait à la main.

Lorsque la décharge d'une batterie se fait à travers un fil métallique fin, ce fil devient incandescent, et peut même être fondu et volatilisé, selon la force de la batterie.

Pour cette expérience, on fait usage de l'*excitateur universel*, ainsi nommé parce qu'il est employé dans une foule d'expériences sur la décharge électrique. Cet appareil, représenté dans la figure 278, se compose de deux tiges de cuivre A et B, isolées chacune sur un pied de verre. Ces tiges sont montées sur charnière, et de plus peuvent glisser dans leurs supports, de manière qu'on puisse les rapprocher plus ou moins et les incliner dans toutes les positions; enfin, entre ces tiges est un petit plateau de bois M destiné à recevoir les objets qu'on veut foudroyer.

Pour fondre des fils, on les fixe en *i* à deux boutons métalliques adaptés sur les tiges, puis faisant communiquer l'une de celles-ci avec l'armature extérieure d'une forte batterie, au moyen d'une chaîne, on met l'autre en communication avec l'armature intérieure à l'aide de l'excitateur à manche de verre ou d'une chaîne fixée à une boule à manche de verre qu'on tient à la main. Au moment où l'étincelle éclate entre cette boule et la batterie, le fil, s'il est assez fin, est fondu en globules incandescents, et même volatilisé, c'est-à-dire réduit en vapeurs qui disparaissent dans l'atmosphère. S'il est plus gros, il n'est que rougi et répand un vif éclat, mais ne fond pas; enfin, plus gros encore, il est simplement échauffé, mais sans devenir lumineux.

Avec les puissantes batteries du musée de Teyler et du Conservatoire des arts et métiers, dont nous avons parlé plus haut, on peut fondre des fils de fer de 15 à 20 mètres de longueur. On peut aussi fondre des fils métalliques dans l'eau, même avec les batteries ordinaires, mais alors il est nécessaire que le fil soit plus fin et beaucoup moins long que dans l'air à cause du refroidissement occasionné par son contact avec le liquide.

371. **Effets mécaniques.** — On appelle ***effets mécaniques*** des batteries électriques, des ruptures, des déchirements, des expansions violentes, qui se produisent dans les corps mauvais conducteurs lorsqu'ils sont soumis à la décharge. Ces effets se démontrent ordinairement au moyen de l'excitateur universel. On place sur le plateau M le corps qu'on veut soumettre à l'expérience, en le met-

tant en contact avec les deux boules qui terminent les tiges A et B, en sorte que celles-ci ne peuvent recevoir la décharge sans la transmettre à l'objet situé sur le plateau. Or, si cet objet est, par exemple, un morceau de bois placé de manière à être frappé dans le sens des fibres, on le voit voler en éclat à l'instant où jaillit l'étincelle.

La figure 279 représente un appareil connu sous le nom de

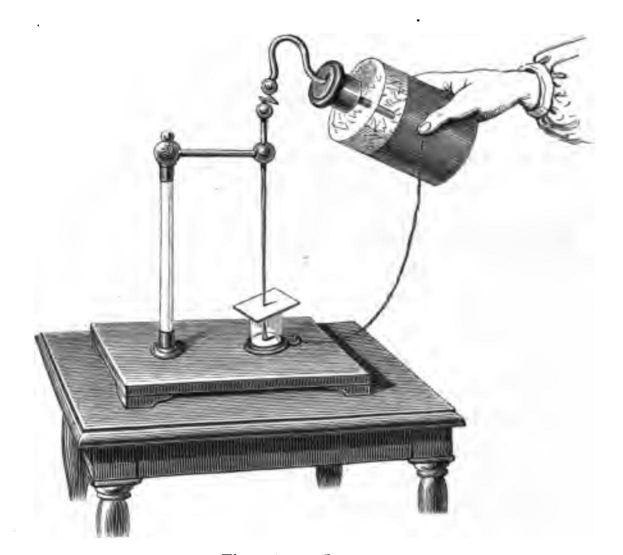


Fig. 279. — Perce-carte.

perce-verre ou de *perce-carte*, et qui sert aussi à démontrer les déchirements produits par l'électricité. Sur une tubulure de verre est posé l'objet qu'on veut percer, une carte par exemple; en dessous est une tige métallique en communication avec un crochet auquel est attaché un cordon métallique; en dessus est une tige de cuivre isolée. Faisant toucher le cordon à l'armature d'une bouteille de Leyde, on approche le crochet de celle-ci du bouton de la tige supérieure. A l'instant où l'étincelle éclate entre les deux boutons, une seconde étincelle jaillit entre les deux pointes, et perce la carte d'un petit trou à passer une épingle.

Pour percer un corps plus résistant, une lame de verre par exemple, une seule bouteille ne suffit pas, il faut une batterie. Celle du musée de Teyler peut percer de part en part un livre de 200 feuillets.

Nous ne parlerons point ici des effets chimiques de l'électricité; ces effets ont déjà été décrits en parlant du canon de Volta, et le seront bientôt plus en détail en traitant de la pile.

CHAPITRE VI

ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE, FOUDRE ET PARATONNERRE.

372. **Identité de la foudre et de l'électricité.** — Dès l'origine des découvertes électriques, plusieurs expérimentateurs s'empressèrent de comparer le mouvement en zigzag de l'étincelle électrique à l'éclair des nuées orageuses, et le craquement qu'elle fait entendre au bruit de la foudre. Mais le rapprochement devint bien plus complet quand on connut les effets énergiques des batteries. Celles-ci, comme la foudre, faisaient entendre une forte explosion, fondaient les métaux, tuaient les animaux, déchiraient les corps qu'elles frappaient, allumaient les substances inflammables, répandaient une forte odeur de soufre; enfin, l'analogie était frappante. C'est Franklin qui, le premier, dans un mémoire publié à Philadelphie, le 7 novembre 1749, établit un parallélisme complet entre la foudre et l'électricité des machines électriques. « Le fluide électrique, dit-il en terminant son Mémoire, est attiré par les pointes; nous ignorons si la foudre est douée de la même propriété; mais puisque l'électricité et la foudre s'accordent par tous les autres points, il est probable qu'elles s'accordent de même en celui-ci : *il faut en faire l'expérience.* »

Le Mémoire de Franklin parvint d'abord à Londres où on n'en comprit point la portée; mais notre illustre naturaliste Buffon l'ayant lu, le fit traduire et imprimer à Paris, où le succès fut complet. Cependant, ce n'est que le 10 mai 1752 que le premier essai

fut tenté pour soutirer aux nuages orageux, au moyen d'une pointe, suivant l'indication de Franklin, l'électricité qu'on supposait qu'ils contenaient. Cette expérience fut faite par Dalibard, botaniste français, à Marly, près Paris, où il avait fait élever, dans un jardin, une barre de fer isolée, de 13 mètres de hauteur, et terminée en pointe. Un nuage orageux étant venu à passer au-dessus de cette tige, il l'électrisa, et pendant un quart d'heure on put en tirer des étincelles qui suffirent pour charger plusieurs bouteilles de Leyde. Dans le même temps, le tonnerre gronda au-dessus des expérimentateurs, ce qui prouva bien que l'électricité qu'on recueillait avait pour cause la présence d'un nuage orageux.

Franklin, de son côté, songeait à soutirer des nuages leur électricité à l'aide d'une pointe, comme il l'avait indiqué. Il attendait pour cela qu'un clocher en construction à Philadelphie fût terminé. Mais impatient d'attendre, il pensa qu'un cerf-volant muni d'une pointe pourrait remplir son but. En juin 1752, un mois après l'expérience de Dalibard, et sans en avoir eu connaissance, il fixa donc par les quatre coins un mouchoir de soie sur deux baguettes de sapin en croix, y ajouta les accessoires ordinaires d'un cerf-volant, puis une pointe de métal, et par un temps d'orage se rendit dans un champ, emmenant avec lui son jeune fils, « crainte, dit-il, du ridicule dont on ne manque pas de couvrir les essais infructueux ». Le cerf-volant lancé, il attacha à la corde une clef et à celle-ci un cordon de soie qu'il fixa à un arbre pour isoler l'appareil. Il tenta d'abord vainement de tirer des étincelles de la clef, et il commençait à désespérer du succès, quand survint une légère pluie; la corde une fois mouillée devint meilleur conducteur, et Franklin obtint enfin l'étincelle désirée. Sa joie fut si grande, qu'il raconte dans ses lettres qu'il ne put retenir ses larmes et qu'il fût mort à ce moment-là sans regret.

373. **Électricité de l'atmosphère.** — Ce n'est pas seulement dans les nuages orageux qu'on trouve de l'électricité libre, comme l'ont constaté Dalibard et Franklin; on en rencontre aussi dans l'atmosphère, même pure et sans nuages. C'est alors de l'électricité positive qu'elle contient, et c'est dans les lieux élevés et les plus découverts que celle-ci est plus abondante. Dans les maisons, dans les rues, sous les arbres, on n'en trouve aucune trace. Pendant les

temps nuageux, c'est tantôt de l'électricité positive, tantôt de l'électricité négative qu'on observe dans l'atmosphère. Quant aux nuages, ils sont généralement tous électrisés, les uns positivement, les autres négativement.

L'électricité des nuages a été constatée à l'aide de pointes métalliques, comme celle de Dalibard, ou au moyen de cerfs-volants et de ballons retenus par des cordes enroulées avec un fil métallique, mais terminées par un cordon de soie qui les isolait de l'observateur. Pour déterminer l'électricité de l'atmosphère, plusieurs procédés ont aussi été mis en usage, mais surtout celui de l'électromètre à feuilles d'or (fig. 259, page 442). Seulement, la boule qui est au-dessus de l'appareil était remplacée par une tige de cuivre de 5 à 6 décimètres, à laquelle était attaché le bout d'un long cordon métallique, terminé à l'autre extrémité par une boule de laiton. Celle-ci étant lancée à une certaine hauteur dans l'atmosphère, on voyait les feuilles d'or diverger d'autant plus que la boule s'élevait davantage, ce qui prouvait qu'elle se chargeait de plus en plus d'électricité. Dans des recherches semblables faites sur le mont Saint-Bernard, M. Becquerel a remplacé la boule par une flèche qu'on lançait au moyen d'un arc. Dans ces expériences, ce n'était pas le frottement de l'air contre la boule ou contre la flèche qui les électrisait, car tandis qu'elles transmettaient de l'électricité aux feuilles d'or lorsqu'elles étaient lancées verticalement, elles n'en donnaient aucune trace quand elles l'étaient horizontalement.

On a beaucoup écrit pour expliquer l'origine de l'électricité de l'atmosphère et des nuages. Les uns l'ont attribuée à la végétation des plantes, les autres à la vaporisation de l'eau à la surface du sol et des mers, d'autres enfin, à des actions chimiques qui se produisent dans les terres et dans les eaux. Cette dernière opinion a surtout été soutenue récemment par M. Becquerel, le savant qui s'est le plus occupé des phénomènes électriques, en France.

374. **Éclairs, tonnerre, foudre.** — Les *éclairs* ne sont autre chose que des étincelles extrêmement intenses qui éclatent entre deux nuages chargés d'électricités contraires. Ils ont quelquefois plusieurs lieues de longueur et affectent, en général, la forme en zigzag de l'étincelle des machines électriques. Leur lumière est d'un blanc éblouissant dans les basses régions de l'atmosphère,

mais dans les hautes, où l'air est plus raréfié, elle prend une teinte violacée.

Le *tonnerre* est le bruit qui succède à l'éclair. Ce bruit et l'éclair sont simultanés dans les nuées orageuses; cependant on n'entend le tonnerre qu'un certain temps après avoir aperçu l'éclair. Ce phénomène est facile à expliquer, si l'on se rappelle que la vitesse de la lumière est si considérable qu'on peut admettre que nous voyons l'éclair au moment même où il éclate, tandis que le son ne parcourant environ que 337 mètres par seconde, autant il y a de fois cette distance entre la nue et nous, autant il s'écoule de secondes avant que nous percevions le roulement du tonnerre. On peut donc calculer en mètres à quelle distance on est d'un nuage orageux, en multipliant 337 par le nombre de secondes qui s'écoule entre l'apparition de l'éclair et le roulement du tonnerre.

Ce bruit varie avec la distance; de près, il est sec et de courte durée, ressemblant assez au son produit par des planches qui tomberaient les unes sur les autres. A une plus grande distance, le bruit se continue sous forme de roulement d'une intensité variable, qui peut se prolonger plusieurs secondes et même une minute. Jusqu'ici, on n'est pas d'accord sur la cause du roulement du tonnerre. Les uns l'ont attribué à un effet de réflexion du son sur les nuages et sur le sol; d'autres ont regardé l'éclair non pas comme une étincelle unique, mais comme une série d'étincelles successives donnant lieu chacune à une détonation particulière; d'autres, enfin, ont attribué le roulement du tonnerre aux zigzags mêmes de l'éclair, et à la plus grande compression de l'air à chaque angle saillant, d'où résulterait l'inégale intensité du son.

La *foudre* est la décharge électrique qui éclate entre un nuage et la terre. En effet, lorsqu'un nuage électrisé passe au-dessus du sol, il agit par influence pour repousser l'électricité de même nom que la sienne et attirer celle de nom contraire; par suite, dès que la tension des deux électricités est plus grande que la résistance de l'air, l'étincelle éclate et on dit que la *foudre tombe,* parce qu'on admet qu'en général l'étincelle se meut de haut en bas; on a observé quelquefois cependant des phénomènes de foudre ascendante.

L'attraction entre les deux électricités étant d'autant plus grande

que la distance est moindre (345), on conçoit que ce sont les corps les plus rapprochés du nuage orageux qui doivent surtout être frappés de la foudre. On observe, en effet, que ce sont les lieux les plus élevés, les monticules, les édifices, les arbres, sur lesquels la foudre tombe de préférence. Elle choisit aussi les meilleurs conducteurs, comme les métaux, les corps humides, les arbres. C'est pourquoi il est imprudent de se placer sous ces derniers en temps d'orage.

375. **Effets de la foudre, petit nombre de ses victimes.** — Les effets de la foudre sont très-variés et souvent bizarres : elle brise les corps mauvais conducteurs, enflamme ceux qui sont combustibles, fond les métaux, tue les animaux, renverse les pôles des aiguilles de boussole. On observe qu'elle n'éclate pas toujours sous forme d'étincelle, mais qu'elle tombe quelquefois sous la forme d'un globe de feu qui descend même assez lentement, comparativement à l'étincelle, puis finit par éclater avec une détonation comparable à celle de plusieurs pièces de canon. C'est à cet état surtout que la foudre incendie les édifices qu'elle frappe. On rapporte qu'en 1718, la foudre étant tombée ainsi sous la forme globulaire à Gouesnon, près Brest, elle fit sauter le toit et les murailles d'une maison, comme l'aurait fait l'explosion d'une mine, et que des pierres furent lancées dans toutes les directions jusqu'à 50 mètres de distance.

La foudre laisse après elle une odeur sulfureuse particulière. Depuis quelques années on attribue cette odeur à l'électrisation de l'oxygène de l'air pour former un produit qu'on désigne sous le nom d'*ozone*.

Beaucoup de personnes ont une frayeur très-vive du tonnerre. Cette frayeur serait bien diminuée si l'on se rendait compte du très-petit nombre d'individus qui périssent par cette cause. En effet, on ne compte en France, en moyenne, que vingt victimes par an, c'est-à-dire à peu près une pour deux millions d'habitants. C'est bien moins que pour d'autres genres d'accidents dont on a beaucoup moins peur. Aux personnes que ce raisonnement ne parviendrait pas à tranquilliser, on peut conseiller, pendant les temps d'orage, des vêtements de soie, et mieux encore des siéges à pieds de verre, ou un disque épais de même matière sur lequel elles

s'isoleraient. Dans de semblables conditions, elles ne peuvent être frappées, et ressentiraient seulement une secousse plus ou moins vive, mais non mortelle, si la foudre tombait près d'elles.

Dans les villages, on est dans l'habitude de sonner les cloches pendant l'orage, pensant par la vertu de la cloche éloigner la nue, et éviter la grêle toujours si dangereuse pour les récoltes. Si ce n'était là qu'un préjugé, il n'y aurait pas grand inconvénient à laisser les gens des campagnes se donner cette petite satisfaction,

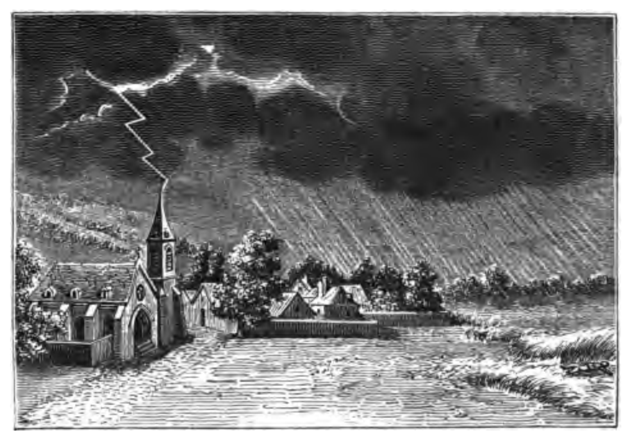


Fig. 280. — Choc en retour.

mais il y a danger pour ceux qui sonnent, car tous les édifices élevés tendent à être foudroyés plutôt que les autres, et on voit en effet la foudre tomber fréquemment sur des clochers et tuer ceux qui s'y trouvent. C'est donc exposer sans résultat la vie de pauvres ignorants que de les laisser sonner les cloches quand le tonnerre gronde.

376. **Choc en retour.** — On nomme *choc en retour* une secousse violente et même mortelle que ressentent parfois les hommes et les animaux à une grande distance du lieu où tombe la foudre (fig. 280). Ce phénomène est une conséquence de l'influence exercée par la nuée orageuse sur les corps qui sont au-dessous d'elle, lesquels sont tous fortement chargés d'électricité contraire à celle

du nuage. Or, si la foudre éclate, et si tout à coup le nuage se décharge par la recomposition de son électricité avec celle du sol, instantanément l'action par influence cesse, et tous les corps chargés d'électricité sur la surface de la terre revenant à l'état neutre, c'est ce passage brusque de l'état électrique à l'état naturel qui occasionne le choc en retour.



Fig. 281. — Paratonnerre.

On reproduit ce phénomène en petit en plaçant une grenouille vivante près d'une forte machine électrique en activité. A chaque fois qu'on décharge la machine, en posant le doigt dessus, on voit la grenouille éprouver une commotion brusque.

377. **Paratonnerre.** — Les *paratonnerres*, comme leur nom l'indique, sont des appareils destinés à préserver des effets de la foudre. Ils consistent en une tige de fer de 6 à 10 mètres de hauteur, fixée sur l'édifice qu'on veut garantir, et communiquant avec le sol au moyen d'une corde de fil de fer ou de cuivre qu'on nomme le *conducteur* (fig. 281). Celui-ci doit être en communication intime avec la terre; pour cela, on le fait plonger dans l'eau

d'un puits ou dans un trou de 4 à 6 mètres de profondeur qu'on remplit ensuite de braise de boulanger, espèce de charbon qui est bon conducteur de l'électricité. Du charbon de coke produirait le même effet.

Le paratonnerre fut inventé par Franklin en 1755. C'est en faisant allusion à cette grande invention que Delille a dit de lui :

> Et la foudre à ses pieds vient mourir en silence.
>
> *Les Trois règnes.*

Franklin et les physiciens de son époque pensaient que les paratonnerres déchargeaient les nuées orageuses en leur soutirant leur électricité. Aujourd'hui que l'on connaît l'action par influence des corps électrisés et le pouvoir des pointes (349), cette explication ne peut plus être admise; c'est l'inverse qu'il faut dire. En effet, lorsqu'un nuage fortement électrisé est en suspension dans l'atmosphère, agissant par influence sur l'électricité neutre du sol, il repousse celle de même nom que la sienne et attire celle de nom contraire, qui s'accumule sur les corps situés au-dessous du nuage. Ces corps ont alors une grande tendance à être frappés de la foudre, mais si on les arme de pointes métalliques en communication avec le sol, celles-ci donnent écoulement au fluide électrique vers le nuage. En sorte que non-seulement elles ne permettent pas à l'électricité de s'accumuler sur les corps terrestres, mais qu'elles tendent progressivement à ramener la nuée orageuse à l'état neutre, double effet qui prévient la chute de la foudre. Cependant, le dégagement d'électricité par les paratonnerres est quelquefois si abondant qu'ils ne peuvent suffire pour décharger le sol; la foudre éclate alors, mais ce sont eux qui, en vertu de leur meilleure conductibilité, reçoivent la décharge.

Il importe que les paratonnerres se terminent en pointe pour donner un plus libre écoulement à l'électricité du sol; et comme leur pointe tend à s'émousser par l'oxydation, c'est-à-dire par la rouille qui se forme sur le fer sous l'influence de l'humidité, il est bon d'en dorer l'extrémité ou d'y adapter une pointe de cuivre rouge, métal moins oxydable que le fer. On conçoit aussi combien il importe qu'il n'y ait pas de solution de continuité dans le con-

ducteur qui fait communiquer la tige avec le sol; le paratonnerre serait alors plus dangereux qu'utile, car il ne serait bon qu'à diriger la foudre sur l'édifice. L'expérience a montré qu'un paratonnerre bien construit protége tout autour de lui à une distance double de la hauteur de sa tige; par suite, plus il est élevé, plus il a d'efficacité.

CHAPITRE VII

MÉTÉORES AUXQUELS ON ATTRIBUE UNE ORIGINE ÉLECTRIQUE.

378. **Grêle.** — On donne le nom de *météores*, d'un mot grec qui veut dire *élevé*, aux phénomènes qui se produisent dans l'atmosphère. Le vent, la pluie, la neige, la foudre sont des météores. Quelques-uns paraissent avoir pour cause l'électricité : outre la foudre, ce sont la grêle, les trombes et les aurores boréales.

La *grêle* est un amas de petits globules de glace qui tombent de l'atmosphère. Ces globules, qu'on nomme *grêlons*, sont ordinairement formés d'une couche transparente autour d'un noyau opaque, qui n'est autre chose qu'un petit flocon de neige compacte. Les grêlons atteignent quelquefois une grosseur considérable, celle d'un œuf de pigeon, et on en a observé dont le poids allait jusqu'à 300 grammes.

La chute de la grêle est souvent précédée d'un bruit particulier qu'on attribue au choc des grêlons entre eux, et qu'on a comparé à celui d'un sac de noix qu'on agite. La grêle est toujours accompagnée d'effets électriques, et le tonnerre précède ou accompagne ordinairement sa chute, ce qui fait penser que l'électricité joue un rôle dans la production de ce phénomène. Mais on n'a point encore expliqué d'une manière satisfaisante la formation des grêlons et comment ils peuvent atteindre, avant de tomber, une grosseur aussi considérable que celle qu'ils ont quelquefois. Volta admettait que placés entre deux nuages chargés d'électricités contraires, ils étaient successivement attirés de l'un à l'autre, absolument comme dans

la danse des pantins, et que c'est pendant ce va-et-vient que la vapeur se condensait et se congelait à la surface des grêlons, et leur faisait atteindre un volume considérable. Cette théorie n'est plus admise aujourd'hui.

379. **Trombes.** — Les *trombes* sont des tourbillons de vent et de vapeurs épaisses qui se forment dans l'atmosphère, renversant et déracinant tout ce qui se rencontre sur leur passage. Elles parcourent souvent une étendue de pays considérable, faisant entendre un bruit assez semblable à celui d'une charrette pesamment chargée qui court sur un chemin rocailleux.

Les éclairs et les globes de feu que lancent souvent les trombes, le bruit du tonnerre qui les accompagne, montrent que l'électricité n'est pas étrangère à la cause de ces redoutables météores.

On distingue deux espèces de trombes : les unes *terrestres* et les autres *marines*, suivant qu'elles se manifestent sur les continents ou sur les mers. Les dernières présentent souvent un aspect remarquable : les eaux de la mer s'agitent et s'élèvent en forme de cône, tandis que les nuages s'abaissant eux-mêmes sous la forme d'un cône renversé, les deux cônes se réunissent par leur sommet, en formant un immense pilier qui unit la mer aux nuages.

380. **Aurore boréale.** — Les *aurores boréales* sont des phénomènes lumineux de l'aspect le plus imposant, qui apparaissent dans l'atmosphère aux pôles de la terre, mais surtout au pôle boréal. Là, à la chute du jour, on voit une lueur vague apparaître à l'horizon dans la direction du méridien magnétique. Puis cette lueur se dessine en arc régulier d'un jaune pâle, tournant sa concavité vers la terre; enfin, des rayons de lumière jaillissent de l'horizon, passant successivement du jaune au vert foncé et au pourpre le plus éclatant. Tous ces rayons convergent vers un même point du ciel, indiqué par le prolongement de l'extrémité sud de l'aiguille d'inclinaison (335), et ils figurent alors le fragment d'une immense coupole lumineuse (fig. 282).

Quand l'arc lumineux est formé, il reste souvent visible pendant plusieurs heures; puis l'éclat diminue, les couleurs disparaissent, et ce brillant phénomène s'affaiblit peu à peu ou s'éteint subitement.

Les aurores boréales ont une action perturbatrice sur l'aiguille

des boussoles, et se forment constamment dans la direction du méridien magnétique; or, l'électricité dégagée dans les actions chimiques présentant exactement les mêmes phénomènes, ainsi qu'on



Fig. 282 — Aurore boréale.

le verra bientôt, on ne peut mettre en doute que la lumière des aurores boréales ne soit un phénomène électrique.

CHAPITRE VIII

ÉLECTRICITÉ DUE AUX ACTIONS CHIMIQUES, PILE DE VOLTA.

381. **Expérience de Galvani.** — On a vu (341) que les deux causes les plus puissantes d'électricité sont le frottement et les combinaisons chimiques. Après avoir fait connaître la première, il nous reste à décrire la seconde. Toutefois, il importe d'observer qu'il ne s'agit point ici d'une nouvelle espèce d'électricité, mais seulement d'un nouveau mode de production d'électricité beaucoup

plus abondant que le frottement, et conduisant, par suite, à des effets bien plus remarquables.

C'est à Galvani, professeur d'anatomie à Bologne, qu'est due la découverte, en 1790, des nouveaux phénomènes électriques. Il observa par hasard qu'une grenouille fraîchement tuée, placée près d'une machine électrique, manifestait de vives contractions lorsqu'on tirait des étincelles de la machine. Le phénomène était simple; ce n'était qu'un effet de choc en retour, et un physicien ne s'y fût pas arrêté. Heureusement Galvani, savant anatomiste, était peu versé dans les connaissances électriques ; il varia donc ses expériences de mille manières pour trouver l'explication du phénomène; et enfin, tout en cherchant ce qui, pour un physicien, n'était plus à chercher, il fit une de ces trouvailles qui, a-t-on dit avec raison, viennent plutôt à l'ignorance qui s'évertue qu'au savoir qui se repose. Il vit une grenouille morte et suspendue par un crochet de cuivre au balcon d'une fenêtre, manifester des contractions violentes toutes les fois qu'agités par le vent ses membres inférieurs venaient heurter contre les barreaux de fer du balcon. C'était là un fait étrange, inexplicable, car il n'y avait plus intervention d'aucune électricité étrangère, ni machine électrique, ni choc en retour. « L'étonnement du professeur de Bologne fut alors parfaitement légitime, écrit Arago, et l'Europe entière s'y associa. »



Fig. 283. — Grenouille de Galvani.

L'expérience de Galvani eut un grand retentissement; de toute part on s'empressa de la répéter, et on peut dire qu'elle fut pour

les grenouilles une date néfaste. La figure 283 représente comment on dispose cette expérience; ayant coupé la tête à une grenouille, on l'écorche rapidement et on la suspend à un crochet de cuivre qu'on passe entre la colonne vertébrale et les filets nerveux qui se trouvent des deux côtés; puis tenant à la main une petite lame de zinc, on met celle-ci d'abord en contact avec la tige de cuivre qui supporte la grenouille, puis ensuite avec les membres inférieurs. Or, à chaque contact, on voit les jambes se replier et s'agiter, et cette moitié de grenouille reproduire les mêmes mouvements que pendant la vie.

Pour expliquer ce phénomène, Galvani admit une électricité propre au corps des animaux, laquelle, passant des nerfs aux muscles par l'arc métallique, était la cause des contractions. Sous le nom d'*électricité animale*, de *fluide vital*, cette théorie fut adoptée surtout par les médecins et les physiologistes, qui pensaient déjà avoir trouvé le secret de la vie. Mais cette brillante illusion s'évanouit bientôt devant les expériences plus rigoureuses de Volta.

382. **Expérience de Volta, théorie du contact.** — Volta, professeur de physique à Pavie, déjà connu par l'invention de l'électrophore et de l'électromètre-condensateur, s'empressa de répéter l'expérience de Galvani, et il remarqua que les contractions de la grenouille étaient beaucoup plus vives lorsque les muscles et les nerfs étaient mis en communication par deux métaux que lorsqu'ils l'étaient par un seul. Ce fait n'avait point échappé à Galvani, mais n'envisageant le phénomène que sous le point de vue physiologique, il n'avait point tenu compte de l'action des deux métaux. Volta, au contraire, qui n'était point anatomiste, ne vit le fait que sous son aspect physique, et en attribua de suite la cause à la présence des deux métaux.

Partant de là, Volta proposa sa *théorie du contact*, dans laquelle il établit comme principe universel que par le seul fait du contact de deux métaux, de deux substances hétérogènes quelconques, il y a toujours décomposition de l'électricité naturelle des deux corps, le fluide positif se portant sur l'un et le fluide négatif sur l'autre. Il nomma *force électro-motrice*, la force qui sépare ainsi les deux électricités au moment du contact; force qui, selon lui, agit en outre à la manière de la force coercitive dans les aimants, pour s'op-

poser à la recombinaison des deux électricités malgré la conductibilité des corps en contact. Enfin, comme la force électro-motrice varie d'intensité suivant les substances en présence, Volta appela corps *bons électro-moteurs* ceux qui développent beaucoup d'électricité par leur contact, et *mauvais électro-moteurs* ceux qui en dégagent peu. Deux des meilleurs électro-moteurs sont le zinc et le cuivre soudés ensemble.

Ce fut alors que Volta fit l'expérience que nous avons décrite en parlant de l'électromètre condensateur (fig. 273 et 274), dans laquelle il chargeait l'électromètre en le touchant avec une lame de cuivre soudée avec une lame de zinc. Cette expérience décisive renversa la théorie de Galvani, et cependant la théorie du contact ne tarda pas à être renversée elle-même par une troisième, la *théorie chimique.*

383. **Pile de Volta.** — C'est en prenant pour point de départ sa théorie du contact que Volta arriva à inventer, en 1800, le merveilleux appareil qui l'immortalisa, et qui est connu encore aujourd'hui sous le nom de *pile de Volta.* Voulant multiplier les contacts et réunir les électricités dégagées par chacun d'eux, l'illustre physicien imagina de superposer successivement, comme le représente la figure 284, un disque de zinc, un disque de cuivre, puis une rondelle de drap mouillée d'eau acidulée; et encore un disque de zinc, un disque de cuivre et une rondelle de drap, et ainsi de suite, avec la scrupuleuse attention de ne jamais intervertir cet ordre. Qu'attendre d'une pareille combinaison? « Eh bien, s'écrie Arago, je n'hésite pas à le dire, cette masse en apparence inerte, cet assemblage bizarre, cette *pile* de tant de couples de métaux dissemblables séparés par un peu de liquide, est, quant à la singularité des effets, le plus merveilleux instrument que les hommes aient jamais inventé, sans en excepter le télescope et la machine à vapeur. »

La réunion d'un zinc et d'un cuivre forme un *couple;* dans la figure ci-après, il y a vingt couples superposés, séparés les uns des autres par des rondelles de drap, et disposés tous dans le même ordre, de manière qu'une des extrémités de l'appareil se termine par un disque de zinc et l'autre par un disque de cuivre. Ainsi disposé, l'appareil de Volta est connu sous le nom de *pile à*

colonne, à cause de sa forme. Depuis son invention, il a eté modifié de bien des manières, mais le nom général de *pile* a été conservé à tous les appareils du même genre; et on désigne encore



Fig. 284. — Pile de Volta.

aujourd'hui sous le nom d'*électricité voltaïque*, l'électricité dégagée par les piles.

384. **Tension de la pile, pôles, électrodes, courant.** — Dans une pile *isolée*, c'est-à-dire ne communiquant avec le sol par aucun conducteur métallique, l'expérience fait voir que la partie médiane est à l'état neutre, et que chaque moitié est tout entière chargée, l'une d'électricité positive, l'autre d'electricité négative, la tension croissant avec le nombre des couples du milieu vers les extrémités. C'est celle vers laquelle sont tournés les zincs de chaque couple qui est électrisée positivement, l'autre l'est négativement. Ces deux extrémités, où a lieu la plus grande tension, sont les *pôles* de la pile; l'un, celui qui correspond à un zinc,

est le *pôle positif;* l'autre, celui qui correspond à un cuivre, le *pôle négatif.* La tension de l'électricité, à chaque pôle, croît avec le nombre des couples, mais l'expérience démontre qu'elle est indépendante de leur surface. Enfin, on nomme *électrodes* deux fils de cuivre attachés respectivement à chaque pôle, et destinés à les faire communiquer entre eux, comme on le voit dans la figure 284.

Cela posé, tant que les pôles ne communiquent pas entre eux, la pile est complétement inerte et ne présente aucun phénomène particulier. Mais qu'on approche les deux électrodes l'une de l'autre jusqu'à ce qu'elles soient presque en contact, on voit jaillir d'un fil à l'autre une petite étincelle due à la recomposition des électricités contraires des deux pôles. Or, ici, la pile ne se trouve pas déchargée comme le serait en pareil cas la bouteille de Leyde; en effet, on voit une seconde étincelle succéder à la première, puis une troisième à la seconde, et ainsi de suite tant que les fils de cuivre sont voisins et que la pile est en activité. Cette continuité d'étincelles fait voir qu'à mesure que les deux électricités des pôles se réunissent par les fils, une nouvelle décomposition d'électricité naturelle se reproduit dans la pile et alimente sans interruption le pôle zinc de fluide positif et le pôle cuivre de fluide négatif. Si, au lieu de laisser un intervalle entre les deux fils de cuivre, on les met en contact, toute étincelle disparaît, mais la recomposition des électricités contraires n'en continue pas moins par les fils, dans lesquels s'opère d'un pôle à l'autre une circulation non interrompue d'électricité. Cette circulation continue de fluide électrique a reçu le nom de *courant*, et c'est pour exprimer que les fils qui réunissent les deux pôles sont constamment traversés par ce courant, qu'on leur a donné le nom d'*électrodes* (chemin de l'électricité), et aussi celui de *réophores* (porteur du courant). Il y a en réalité deux courants de sens contraires dans les électrodes; mais on ne considère jamais que le courant positif, c'est-à-dire celui qui va du pôle positif au pôle négatif. Nous représenterons désormais, dans nos dessins, la direction du courant par une petite flèche allant du pôle positif au pôle négatif.

385. **Théorie chimique de la pile.** — La théorie du contact qu'avait proposée Volta pour expliquer la production de l'électricité dans la pile, ne tarda pas à avoir le sort du fluide vital de Galvani.

Un compatriote de Volta, Fabroni, fut le premier à attaquer sa théorie, disant que c'était l'oxydation des lames de zinc par l'eau acidulée des rondelles qui était la cause principale du dégagement d'électricité dans la pile. Peu après, Wollaston et Davy, en Angleterre, soutinrent la même opinion et l'appuyèrent d'ingénieuses expériences; enfin, M. de la Rive, à Genève, et M. Becquerel, en France, firent voir d'une manière victorieuse que dans toute action chimique il y a toujours production d'électricité, et que lorsqu'un acide attaque un métal, constamment ce dernier s'électrise négativement et l'acide positivement.

La théorie chimique doit donc seule être admise aujourd'hui; dans cette théorie, toute l'électricité qui se dégage dans la pile décrite ci-dessus, ainsi que dans les autres espèces de piles, est due à l'action de l'eau acidulée sur le zinc de chaque couple. En sorte que ces rondelles imprégnées d'acide sulfurique auxquelles Volta attribuait un rôle tout passif, celui de transmettre l'électricité d'un couple au suivant, ces rondelles, disons-nous, sont, au contraire, la cause qui développe l'électricité.

386. **Pile à charbon.** — La pile de Volta a subi de nombreuses modifications, et les appareils de ce genre les plus en usage aujourd'hui sont la pile de Bunsen et celle de Daniell. La première, connue aussi sous le nom de *pile à charbon*, fut inventée, il y a une vingtaine d'années, par M. Bunsen, physicien à Berlin.

Chaque couple de cette pile se compose de quatre pièces : 1° un vase de faïence A (fig. 285), contenant de l'eau acidulée avec de l'acide sulfurique; 2° un cylindre de zinc B, auquel est soudée une longue lame de cuivre rouge; 3° un vase C en terre de pipe peu cuite, laquelle est très-poreuse et perméable au liquide; ce vase est rempli d'acide azotique; 4° enfin, un cylindre de charbon de coke D, très-calciné et bon conducteur de l'électricité. A sa partie supérieure ce charbon est percé d'un trou où se place un petit cylindre de cuivre rouge auquel est soudée une lame de même métal.

Lorsqu'on veut faire fonctionner la pile, on place d'abord dans le vase de faïence le cylindre de zinc, puis dans celui-ci le vase poreux, et enfin le charbon, comme on le voit en P sur la gauche du dessin. Dans cette pile, il y a double action chimique, l'une due à la décomposition de l'eau par l'acide sulfurique et par le zinc

avec formation d'un sel nommé ***sulfate de zinc;*** l'autre produite par l'hydrogène qui, devenant libre par la décomposition de l'eau, se porte au travers du vase poreux sur l'acide azotique et le décompose. De ce double effet résultent deux courants de même sens, dont les intensités s'ajoutent et dont la direction est telle, que

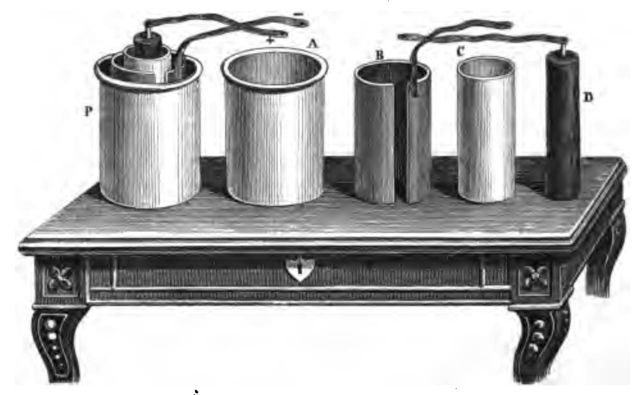


Fig. 285. — Pile à charbon.

c'est au charbon que correspond le pôle positif et au zinc le pôle négatif.

Pour obtenir des effets énergiques, on réunit ensemble plusieurs couples, comme le montre la figure 286, en ayant soin que la lame de cuivre, soudée au zinc de chaque couple, aille s'adapter au charbon du couple suivant toujours dans le même ordre. Le nombre des couples qu'on réunit ainsi pour former une ***batterie voltaïque*** varie avec les effets qu'on veut obtenir; il a été porté jusqu'à 800, et peut aller bien au delà.

CHAPITRE IX

EFFETS DE LA PILE.

387. **Effets physiologiques.** — Les effets des courants électriques se divisent en effets physiologiques, calorifiques, lumineux, chi-

miques et magnétiques. Tous sont dus à la recombinaison des électricités contraires, de même que les effets de la machine électrique; mais ils sont bien plus remarquables et bien plus énergiques à cause de la continuité de leur action.

Les effets physiologiques consistent en secousses et contractions violentes que le courant imprime aux muscles non-seulement des



Fig. 286. — Commotions de la pile.

animaux vivants, mais des animaux morts, ainsi qu'on l'a déjà vu dans l'expérience de la grenouille de Galvani. Lorsqu'on ne touche qu'un des pôles de la pile, on ne ressent aucune secousse, mais si l'on touche les deux pôles, ou si l'on prend dans les mains les deux électrodes (fig. 286), on ressent une commotion comparable à celle de la bouteille de Leyde; toutefois, avec cette différence, que tandis que cette dernière ne donne qu'une secousse, et que si on veut la renouveler, il faut de nouveau charger la bouteille; la pile, au contraire, fournit des commotions qui se répètent sans

cesse. Ce phénomène s'explique par la continuité de l'action chimique dans la pile, qui reproduit constamment de nouvelle électricité libre à chaque pôle pour remplacer celle qui s'est recombinée par les électrodes et le corps de l'expérimentateur.

Jean Aldini, neveu de Galvani, fut le premier à étudier les effets de la pile sur les animaux morts. Étant venu à Paris au commencement de ce siècle, il répéta en grand plusieurs de ses expériences à l'École vétérinaire d'Alfort, près Paris. « Là, on vit la tête d'un bœuf, détachée du corps et placée sur une table d'amphithéâtre, excitée par le courant électrique, ouvrir les yeux et les rouler en fureur, enfler ses naseaux, secouer ses oreilles, comme si l'animal eût été vivant et se fût préparé au combat. Sur une autre table, les ruades d'un cheval tué faillirent blesser les assistants et brisèrent les appareils placés auprès de l'animal mort. Plus tard, en Angleterre, des physiologistes achetèrent d'un criminel condamné à mort son propre cadavre (marché usité dans ce pays) pour vérifier les théories électro-animales, et aussi dans l'intention charitable de rappeler le pendu à la vie et de le moraliser ensuite. Le résultat fut terrifiant. Le cadavre ne revint pas à la vie, mais une respiration violente et convulsive fut reproduite, les yeux se rouvrirent, les lèvres s'agitèrent, et la face de l'assassin, n'obéissant plus à aucun instinct directeur, présenta des aspects de physionomie si étranges que l'un des assistants s'évanouit d'horreur et resta pendant plusieurs jours frappé d'une véritable obsession morale. » (Babinet, *Études et lectures sur les sciences d'observation.*)

388. **Effets calorifiques.** — Les effets calorifiques consistent en une température élevée que communiquent les courants aux conducteurs qu'ils traversent. En faisant passer le courant dans des fils ou des feuilles de métal, on les voit s'échauffer instantanément non-seulement assez pour devenir incandescents, mais pour fondre et se volatiliser lorsque le courant est assez puissant. Les fils de fer brûlent ainsi avec un vif éclat; l'argent avec une lumière verdâtre, en répandant beaucoup de fumée résultant de sa vaporisation; l'or avec une lumière blanc bleuâtre; le platine, métal infusible dans les fourneaux les plus intenses, se fond et s'arrondit en globules d'un éclat éblouissant, lorsqu'il est traversé par le courant

électrique. M. Despretz a pu fondre ainsi, en quelques minutes, 250 grammes de platine avec une pile à charbon de 600 couples. Le charbon est le seul corps qui jusqu'ici n'ait point été fondu. Cependant, le même physicien, en faisant passer le courant dans des baguettes de charbon très-pur, est parvenu à les ramollir à tel point qu'elles se sont courbées et ont pu se souder ensemble, ce qui indique un commencement de fusion.

389. **Effets lumineux.** — Les effets calorifiques décrits ci-dessus sont toujours accompagnés d'un dégagement de lumière plus ou moins intense. Mais pour obtenir de la lumière électrique tout l'éclat qu'elle peut donner, on fait usage de baguettes de charbon de coke très-calciné, qu'on met d'abord en contact, et qu'on fait communiquer l'une avec le pôle positif, l'autre avec le pôle négatif d'une forte pile (fig. 287). Aussitôt les deux pointes de charbon deviennent incandescentes et répandent une lumière éblouissante dont on ne peut soutenir l'éclat. Si l'on écarte alors un peu les charbons, les deux électricités continuent à se recomposer d'un charbon à l'autre, en donnant naissance à un arc lumineux qu'on a nommé *l'arc voltaïque*, et dont la longueur peut atteindre jusqu'à 7 centimètres avec une pile de 600 couples. Dans cette expérience, on voit le charbon positif se creuser et diminuer, tandis que le charbon négatif augmente; d'où l'on conclut que le charbon est transporté du premier pôle au second; ce qui explique comment le courant continue à passer, malgré l'intervalle qui sépare les deux charbons.

L'intensité de la lumière électrique est considérable. Comparée à la lumière des bougies, on a trouvé que 48 couples à charbon faibles éclairent autant que 572 bougies; et 46 couples plus forts ont donné une lumière équivalant au quart de celle du soleil. La lumière électrique est si vive, qu'avec 100 couples elle occasionne des maux d'yeux très-douloureux, et qu'avec 600, un seul instant suffit pour occasionner des maux de tête et d'yeux violents, et pour brûler la figure comme le ferait un fort coup de soleil.

C'est M. Foucault qui, le premier, en 1844, fit usage de la lumière électrique pour remplacer la lumière du soleil dans le microscope solaire (316). Depuis lors, plusieurs tentatives ont été faites pour appliquer cette vive lumière à l'éclairage public, soit

dans les fêtes, dans les grands ateliers, ou dans les théâtres pour des effets de mise en scène. A l'Opéra, dans le dernier acte du *Prophète*, c'est par la lumière électrique que s'illumine le magique tableau de la destruction et de l'incendie du palais. La



Fig. 287. — Éclairage électrique.

figure 287 représente un modèle d'éclairage electrique. La pile est disposée dans l'intérieur d'un piédestal en fonte; sur une colonne de même matière sont fixées deux baguettes de charbon, en communication respectivement avec les deux pôles de la pile par des fils de cuivre recouverts de gutta-percha qui les isole.

390 **Effets chimiques de la pile.** — Les effets chimiques de la

pile consistent en séparation et en transport des éléments des corps traversés par le courant. Pour se rendre compte de ces décompositions, il importe de rappeler ici ce que c'est qu'un oxyde, un acide et un sel.

En chimie, on nomme *oxydes* des composés d'oxygène et d'un autre corps qui, en général, est un métal. Par exemple, nous avons déjà dit que la rouille qui recouvre les vieilles ferrailles est un oxyde de fer; de même la couleur rouge, connue sous le nom de *vermillon*, est un oxyde de plomb; la potasse, utilisée dans le blanchissage, est un oxyde d'un métal nommé *potassium*.

Les *acides* sont aussi des composés d'oxygène et d'un autre corps, qui n'est plus un métal, mais ordinairement le soufre, l'azote ou le carbone; composés qu'on désigne respectivement sous les noms d'*acide sulfurique*, d'*acide azotique*, et d'*acide carbonique*. Ces corps tirent leur nom de la saveur acide qu'ils possèdent. Quelques-uns, comme l'acide azotique et l'acide sulfurique, sont extrêmement corrosifs et attaquent violemment la plupart des métaux pour les transformer en oxydes d'abord et ensuite en sels.

Enfin, on appelle *sels* des corps qui résultent de l'union d'un acide avec un oxyde métallique. Par exemple, l'acide sulfurique, en se combinant à la potasse, forme un sel qu'on désigne sous le nom de *sulfate de potasse;* avec l'oxyde de cuivre, il forme du *sulfate de cuivre*. En s'unissant aux mêmes oxydes, l'acide azotique donne des *azotates de potasse* ou *de cuivre*.

Cela posé, nous revenons aux décompositions opérées par la pile.

391. **Décomposition de l'eau.** — La première décomposition par les courants a été celle de l'eau, en 1800, par deux Anglais, Carlisle et Nicolson. Pour répéter cette expérience, on dispose l'appareil comme on le voit dans la figure 288. Un vase de verre est mastiqué sur un socle de bois. Du fond du vase s'élèvent deux petits fils de platine qui se prolongent dans l'intérieur du socle, jusqu'à deux tubulures de cuivre *a* et *b* fixées sur les côtés. Le vase étant rempli d'eau, qu'on a soin d'aciduler un peu pour qu'elle conduise mieux l'électricité, on recouvre les fils de platine de deux cloches de verre O et H remplies d'eau, puis on fait arriver l'une des électrodes d'une pile de trois ou quatre couples dans la tubulure *a*, et l'autre dans la tubulure *b*. Le courant passe aussitôt

d'un fil à l'autre au travers de l'eau, et en même temps commence la décomposition, ce qu'on reconnaît à des bulles abondantes de gaz qui se dégagent du platine et montent dans les cloches.

En analysant les gaz ainsi recueillis, on reconnaît que la cloche O, qui correspond au pôle positif, ne contient toujours que de l'oxygène, et la cloche H que de l'hydrogène; de plus, on observe que

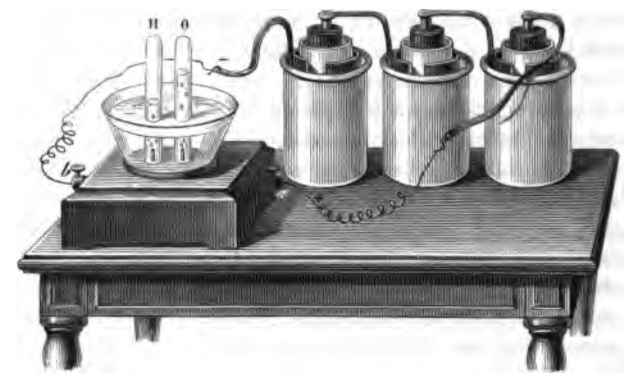


Fig. 288. — Décomposition de l'eau par la pile.

le volume du dernier gaz est constamment double du premier. Cette expérience montre donc que l'eau est formée de deux volumes d'hydrogène pour un d'oxygène.

392. **Décomposition des oxydes et des sels.** — Le même courant électrique, qui décompose l'eau, décompose aussi les oxydes métalliques, les acides et les sels. Dans la décomposition des oxydes métalliques, c'est toujours l'oxygène qui se rend au pôle positif, de même que pour l'eau, tandis que le métal est transporté au pôle négatif. Le même transport des éléments a lieu dans la décomposition des acides; l'oxygène se portant encore au pôle positif et l'autre composant au pôle négatif. Avec les sels, il se présente plusieurs cas: tantôt l'acide et l'oxyde du sel sont simplement séparés, sans être décomposés ni l'un ni l'autre, et alors l'acide tout entier est entraîné par le courant vers le pôle positif, et l'oxyde métallique vers le pôle négatif; tantôt il y a non-seulement séparation de l'acide et de l'oxyde, mais décomposition de ce dernier; dans ce

cas, l'oxygène de l'oxyde se rend au pôle positif avec l'acide, et le métal seul se rend au pôle négatif. C'est de ce dernier cas qu'on va voir l'application à la galvanoplastie (393).

C'est Davy, illustre chimiste anglais, qui, le premier, au commencement de ce siècle, décomposa, par la pile, la potasse, la soude, la baryte, la chaux, la magnésie, l'alumine, etc., et fit voir que ces substances, qu'on regardait alors comme des corps simples, étaient toutes composées d'oxygène et de métaux auxquels on a donné les noms de *potassium*, *sodium*, *barium*, *calcium*, etc.

Les brillantes découvertes de Davy firent époque dans l'histoire de la science; la France y applaudit libéralement, et il se produisit alors un fait qui montra combien les sciences tendent à rapprocher les nations, même les plus rivales. En 1802, Napoléon, alors premier consul, pressentant l'avenir de la pile de Volta, avait créé deux prix, l'un de 3,000 francs « pour la meilleure expérience faite dans le cours de chaque année sur le fluide électrique », l'autre de 60,000 francs « pour le physicien qui ferait faire à l'électricité voltaïque un pas comparable à celui qu'avaient fait faire à la science Franklin et Volta. » Ce second prix ne fut jamais décerné; mais, en 1808, au moment des guerres acharnées entre la France et l'Angleterre, l'Institut accorda le prix de 3,000 francs à Davy pour ses belles découvertes, et cette somme lui fut envoyée, au nom de Napoléon, de Paris à Londres.

APPLICATIONS DES DÉCOMPOSITIONS OPÉRÉES PAR LA PILE.

393. **Galvanoplastie.** — Dans les procédés ordinaires, pour reproduire en métal des statues, des bas-reliefs, des ustensiles quelconques, on établit des moules de terre sèche qui représentent fidèlement en creux ces mêmes objets; puis on y coule de la fonte ou du bronze en fusion, et lorsque le métal s'est solidifié, on obtient en relief identiquement le même sujet que le moule représente en creux. Dans le procédé qui constitue la galvanoplastie, il faut bien encore un moule de l'objet à reproduire, mais ensuite cette reproduction se fait sans feu et sans fusion : c'est le courant d'une pile qui vient paisiblement deposer sur une empreinte fidèle

des objets, une couche de métal plus ou moins épaisse. C'est ce que signifie le mot *galvanoplastie*, qui est formé du mot *galvanisme* et d'un mot grec qui veut dire *modeler*. Cet art a été inventé en même temps par M. Spencer, à Londres, et par M. Jacobi, à Saint-Pétersbourg, en 1838, un an avant l'invention du daguerréotype.

D'après ce qui précède, on voit que la pratique de la galvanoplastie se compose de deux opérations distinctes : 1° la préparation du moule ou empreinte des objets à reproduire; 2° le dépôt d'un métal dans ce moule. La première est la plus délicate, et celle d'où dépend le succès du modelage électrique.

Les différentes substances qui servent à prendre les empreintes sont la cire d'Espagne, la cire blanche, le plâtre, et surtout la gutta-percha, espèce de gomme qui a été appliquée à une foule d'usages depuis quelques années. Cette substance, qui est dure à la température ordinaire, se ramollit et devient très-ductile à une température peu élevée; il suffit pour cela de la chauffer au bain-marie, c'est-à-dire dans l'eau chaude. Lorsqu'elle a pris ainsi un degré de mollesse convenable, on la façonne en plaque, puis appliquant dessus l'objet qu'on veut mouler, on le soumet à une pression suffisante pour que toutes ses parties, même les traits les plus déliés, tracent leur empreinte sur la gutta. Quand celle-ci est ensuite refroidie, on la sépare sans difficulté du type à reproduire, lorsqu'il est métallique, tel qu'une médaille par exemple; mais si l'on opère sur une gravure sur bois, sur un plâtre, sur un sujet de terre cuite, la gutta y adhère, et on est exposé à ne pouvoir la séparer sans déchirure. On obvie à cet inconvénient en déposant sur l'objet à reproduire, à l'aide d'une brosse douce, une légère couche de plombagine, substance qu'on trouve dans le commerce en poudre extrêmement fine; son vrai nom est *graphite*, minéral qui n'est autre chose que du carbone à peu près pur et très-bon conducteur de l'électricité.

Supposons que le sujet à reproduire soit une médaille; le moule une fois obtenu (fig. 289), on a en creux et retournée la médaille représentée dans la figure 290. Il reste alors à rendre ce moule conducteur, à le *métalliser*, comme on dit; car la gutta étant un corps isolant ne pourrait transmettre le courant de la pile. Or, c'est encore à l'aide de la plombagine qu'on communique au moule la

conductibilité qui lui manque. Pour cela, avec une brosse douce ou un blaireau, on recouvre de plombagine l'empreinte partout où l'on veut que s'opère le dépôt métallique; puis on fixe à la plaque de gutta trois fils de cuivre, l'un destiné à la suspendre dans un bain métallique, les deux autres à conduire le courant du premier fil sur l'empreinte plombaginée (fig. 289).

Le moule est alors prêt à recevoir le métal qu'on veut y faire déposer; c'est ordinairement du cuivre, quelquefois de l'argent ou de l'or,

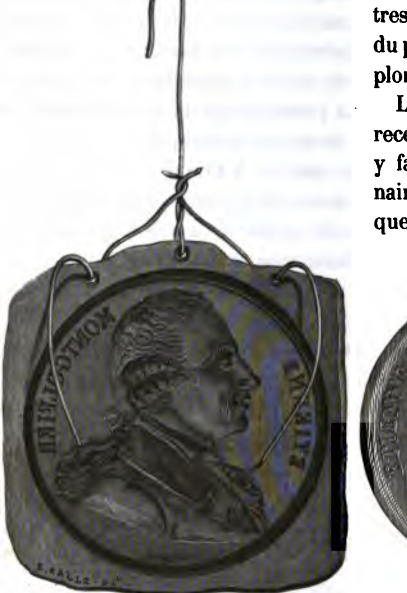




Fig 289. Fig. 290.

Moule pour la galvanoplastie.

métaux qui se déposent tous très-bien. Pour le cuivre, on prend un bain saturé de sulfate de cuivre, c'est-à-dire contenant de ce sel autant qu'il peut en dissoudre; faisant ensuite communiquer les deux pôles de la pile avec deux baguettes métalliques placées au-dessus du bain (fig. 291), on suspend le moule en gutta à la baguette négative, c'est-à-dire en communication avec le pôle négatif, et à l'autre baguette on suspend une plaque de cuivre rouge à peu près de même grandeur que le moule. Quant à la pile, elle se compose de deux ou trois couples de Daniell, sys-

tème préférable ici à la pile à charbon, parce que le courant en est plus constant. La différence entre cette pile et celle de Bunsen, c'est que le charbon de cette dernière (fig. 285) est remplacé par un cylindre de zinc Z (fig. 291); en dehors de celui-ci est un vase poreux identique à celui de la pile à charbon, puis un cylindre de cuivre rouge C. Enfin, le tout plonge dans un vase de verre P rempli d'une dissolution de sulfate de cuivre, qu'on entretient à l'état de saturation en plaçant au fond du vase des cristaux de sulfate de cuivre qui se dissolvent lentement. Cela posé, le vase poreux étant rempli d'eau acidulée avec de l'acide sulfurique, il y a décomposition de l'eau et formation de sulfate de zinc, comme

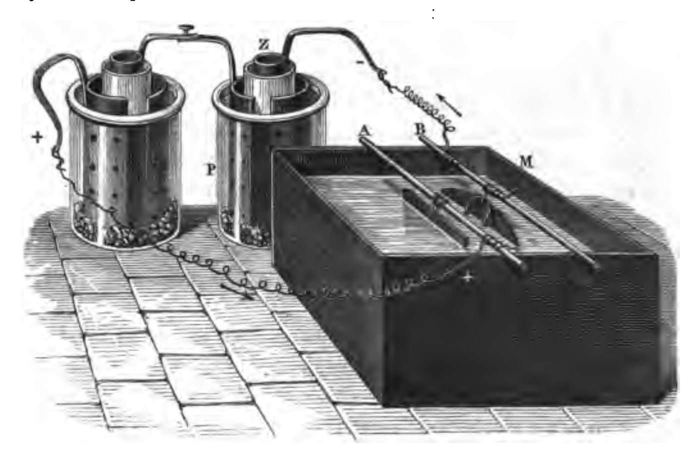


Fig. 291. — Bain pour la galvanoplastie.

dans la pile à charbon; mais de plus, l'hydrogène provenant de la décomposition de l'eau se porte sur le sulfate de cuivre en dissolution dans le vase P et le décompose; de là résulte une seconde action chimique qui s'ajoute à la première pour donner un courant très-régulier, tant qu'on a soin d'entretenir la dissolution du vase P à l'état de saturation, en y ajoutant de temps en temps de nouveaux cristaux.

Ces détails connus, voici comment agit le courant de la pile dès qu'il passe de la baguette A à la baguette B, au travers de la dis-

solution de cuivre qui remplit la cuve M : non-seulement le sulfate de cuivre est décomposé, mais aussi l'oxyde de cuivre qui entre dans sa composition, lequel est réduit en oxygène et en métal. Or, par suite de cette double décomposition, l'acide sulfurique et l'oxygène mis en liberté se rendent au pôle positif, tandis que le cuivre se porte seul au pôle négatif, où il se dépose lentement sur l'empreinte métallisée, y acquérant graduellement une épaisseur de plus en plus sensible. Au bout de deux jours, le cuivre présente assez de solidité pour qu'on puisse le détacher du moule, et on a alors un *fac-simile* d'une pureté et d'une fidélité incomparables. Quant à la plaque de cuivre rouge plongée dans le bain, au pôle positif, voici son usage : elle sert d'abord évidemment à transmettre le courant; mais, de plus, à mesure que l'oxygène et l'acide sulfurique mis en liberté sont entraînés au pôle positif, le premier de ces corps s'unissant au cuivre de la plaque, le transforme en oxyde, et ce dernier se combinant aussitôt à l'acide sulfurique, il se reproduit du sulfate de cuivre en quantité précisément égale à celle qui a été décomposée; en sorte que le bain reste toujours au même degré de concentration, c'est-à-dire contient toujours la même quantité de sel en dissolution, et, par suite, peut servir indéfiniment, si l'on a soin de renouveler la plaque de cuivre rouge.

394. **Dorure et argenture par la pile.** — La dorure et l'argenture électriques ont beaucoup de rapport avec la galvanoplastie, dont elles ne diffèrent que parce qu'au lieu de faire précipiter des métaux dans un moule pour reproduire des objets donnés, elles ne font que recouvrir ceux-ci d'une couche mince d'or ou d'argent.

Il n'y a plus ici de moule à préparer, comme dans la galvanoplastie, mais les pièces métalliques qu'on veut dorer ou argenter doivent subir trois opérations qui demandent à être faites avec soin : c'est le *recuit*, le *dérochage* et le *décapage*. Le recuit consiste à chauffer les pièces sur des charbons incandescents pour détruire les matières grasses qui pourraient adhérer à leur surface. Puis, comme ces pièces, qui généralement sont en cuivre, se sont oxydées à la surface, on enlève, en grande partie du moins, la couche d'oxyde par le dérochage, opération qui consiste à plonger les pièces quelques instants dans de l'acide sulfurique

étendu d'eau, à les frotter avec une brosse dure et à les laver. Enfin, la surface des pièces n'étant pas encore parfaitement pure, on les soumet au décapage en les plongeant dans de l'acide azotique ordinaire, ou *eau-forte*, puis dans de l'acide azotique dans lequel on a projeté un peu de sel marin et de suie. On lave alors les pièces dans l'eau distillée, et on les sèche dans de la sciure de bois.



Fig. 292. — Argenture par la pile.

Les pièces ainsi préparées, supposons qu'il s'agisse de les argenter; pour cela, on les suspend au pôle négatif d'une pile à charbon de trois ou quatre couples (fig. 292), et on les plonge dans un bain d'argent chauffé à 60 ou 80 degrés. Enfin, on fixe à l'électrode positive une plaque d'argent *a*, qui se dissout au fur et à mesure que l'argent est précipité par le courant, et entretient ainsi dans le bain une quantité constante de métal. Le sel d'argent qu'on fait dissoudre dans le bain est, en général, un cyanure double d'argent et de potassium, c'est-à-dire un sel composé de deux métaux, argent et potassium, et de cyanogène, corps gazeux formé de carbone et d'azote. L'épaisseur de la couche d'argent qui se dépose sur les pièces dépend du temps de leur immersion et de l'intensité du courant.

Pour dorer par la pile, les procédés sont identiquement les mêmes que pour argenter; seulement, on doit faire usage d'un bain d'or, et terminer le pôle positif par une plaque d'or. Le sel d'or qu'on fait dissoudre dans le bain est ordinairement un cyanure d'or et de potassium.

La dorure et l'argenture constituent un art tout nouveau. Dès 1803, Brugnatelli, élève de Volta, avait doré deux médailles d'argent en les suspendant au pôle négatif de la pile dans une dissolution d'or, mais il n'alla pas plus loin. C'est M. de la Rive, à Genève, qui, le premier, en 1840, indiqua un procédé de dorure par la pile et fit connaître l'utilité qu'on pouvait retirer des courants électriques pour la dorure des métaux. Cependant, les bains d'or et l'appareil voltaïque dont il faisait usage ne donnaient pas une dorure solide, et, de plus, beaucoup d'or se perdait. A la fin de la même année, M. Elkington, en Angleterre, fit connaître, le premier, le bain de cyanure d'or et de potassium. Enfin, M. Ruolz, quelques mois après, trouva de nouveaux bains pour argenter, platiner, etc., et parvint à dorer et à argenter un grand nombre de métaux. Des brevets furent pris et exploités sur une grande échelle, mais on a trop oublié depuis la part de gloire qui revenait au savant physicien de Genève.

CHAPITRE X

ÉLECTRO-MAGNÉTISME.

395. **Relation entre le magnétisme et l'électricité.** — On remarqua de bonne heure l'analogie qui lie les fluides électriques aux fluides magnétiques, en ce sens que dans l'électricité de même que dans le magnétisme, chaque fluide se repousse lui-même et attire le fluide contraire. De plus, on avait observé que la foudre en tombant sur un navire renverse souvent les pôles des aiguilles de boussoles, quelquefois même leur enlève toute leur propriété magnétique. Mais si c'était là autant de points de rapprochement entre l'électricité et le magnétisme, d'un autre côté, les dissemblances étaient nombreuses : par exemple, les fluides magnétiques ne sont pas transmis comme les fluides électriques par les corps

conducteurs; mis en communication avec le sol, un aimant ne revient pas à l'état neutre, comme le fait en pareil cas un corps électrisé; enfin, l'électricité peut se développer sur tous les corps, tandis que le magnétisme ne se manifeste que dans un très-petit nombre de substances. Au milieu de ces ressemblances et de ces dissemblances, on ne pouvait donc rien affirmer sur l'identité des causes qui produisent l'électricité et le magnétisme; lorsqu'à la fin de 1819, Œrsted, professeur de physique à Copenhague, fit une mémorable découverte, qui désormais liait intimement l'un à l'autre ces deux agents physiques. L'illustre physicien donna ainsi naissance à toute une branche nouvelle de la physique, qu'on a désignée sous le nom d'*électro-magnétisme*, pour exprimer que les phénomènes qu'elle fait connaître sont à la fois du domaine du magnétisme et de l'électricité.

396. **Action des courants sur les aimants.** — Œrsted avait déjà

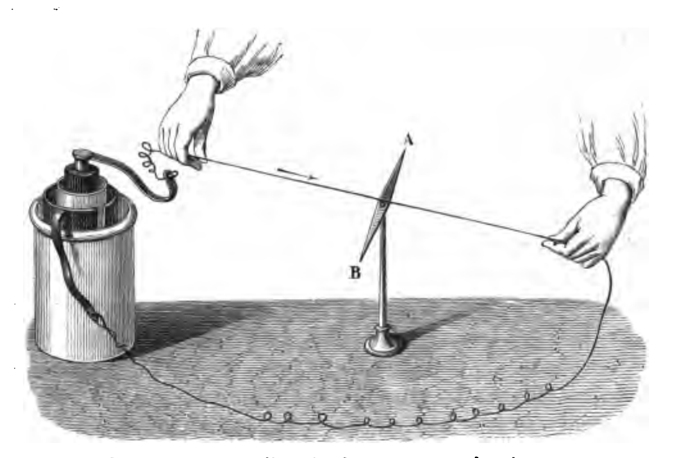


Fig. 293. — Action directrice des courants sur les aimants.

fait de nombreuses tentatives pour constater la liaison qui, selon lui, devait exister entre le magnétisme et l'électricité, lorsqu'il trouva que les courants électriques « ont une action directrice sur l'aiguille aimantée et tendent toujours à la diriger perpendiculairement à leur propre direction. »

Pour vérifier cette action des courants sur les aimants, on dispose l'expérience comme le fait voir la figure 293. Une aiguille aimantée, mobile sur un pivot, étant en équilibre dans la direction du méridien magnétique, on en approche un fil parcouru par un courant voltaïque, en ayant soin de le présenter à l'aiguille dans le sens de sa longueur. Or, on voit alors l'aiguille dévier de sa position d'équilibre, osciller et s'arrêter dans une position sensiblement perpendiculaire à celle du courant ; nous disons sensiblement perpendiculaire, parce que le magnétisme terrestre tend toujours à ramener l'aiguille dans sa première position (333).

Dans l'expérience d'Œrsted, le sens dans lequel est dévié le pôle austral de l'aiguille (celui qui regarde le nord) varie avec la direction du courant : si celui-ci va du sud au nord, au-dessus de l'aiguille, le pôle est dévié vers l'ouest; si, au contraire, il va du nord au sud, toujours au-dessus de l'aiguille, c'est vers l'est que se dirige le même pôle. Enfin, quand le courant passe au-dessous de l'aiguille, les mêmes phénomènes se reproduisent, mais en sens inverse.

397. **Hypothèse du bonhomme d'Ampère.** — Ampère, à qui est due la découverte de la plus grande partie des phénomènes électro-magnétiques, a donné une expression simple de la loi d'après laquelle les courants dirigent l'aiguille aimantée, en adoptant l'hypothèse suivante, connue sous le nom d'*hypothèse du bonhomme d'Ampère*. Ce savant a supposé un observateur couché dans le fil que parcourt le courant, de manière qu'ayant toujours la face tournée vers l'aiguille, le courant entre par les pieds et sorte par la tête. Or, ayant ainsi personnifié le courant, Ampère a trouvé que dans toutes les directions qu'on peut lui donner, soit au-dessus, soit au-dessous de l'aiguille, « toujours le pôle austral est dévié à gauche du courant », c'est-à-dire à gauche de l'observateur qu'on suppose placé dans le fil.

398. **Actions des aimants sur les courants et des courants sur les courants ; solénoïdes.** — La découverte d'Œrsted ne fut pas plus tôt connue, que plusieurs physiciens s'empressèrent de rechercher s'ils ne trouveraient pas d'autres analogies entre l'électricité voltaïque et le magnétisme. Ampère surtout fit bientôt connaître une foule de phénomènes nouveaux, dont nous citerons les suivants :

1° De même que les courants ont une action directrice sur les aimants, réciproquement les aimants dirigent les courants. Pour le démontrer, on enroule en cercle un fil de cuivre dont les deux extrémités sont fixées à deux pointes d'acier qui plongent dans deux godets pleins de mercure (fig. 294); ces godets communiquant par deux tiges et deux colonnes de cuivre avec les pôles d'une pile, on a un circuit mobile traversé d'une manière continue

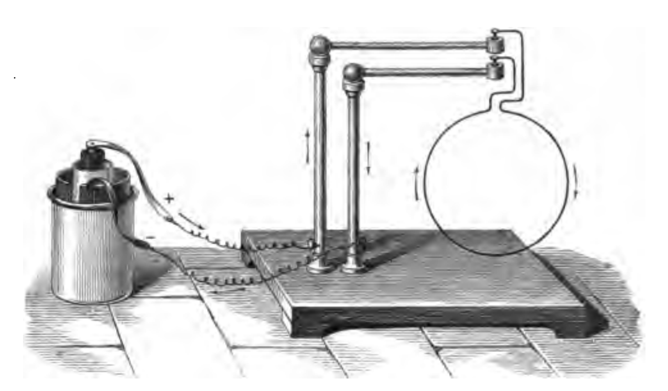


Fig. 294. — Action directrice du globe sur les courants.

par un courant. Or, ce circuit étant en repos, si l'on avance au-dessous et dans son plan même un fort barreau aimanté, « on voit le circuit tourner et s'arrêter transversalement au barreau; ce qui est la réciproque de l'expérience d'Œrsted ».

2° Le globe terrestre, qui agit comme un aimant sur les aiguilles magnétiques, agit de la même manière sur les courants mobiles, c'est-à-dire « qu'il les dirige perpendiculairement au méridien magnétique ». C'est encore avec l'appareil représenté dans la figure ci-dessus que l'on constate cette action. Pour cela, le courant ne passant pas encore dans le circuit, on le place dans la direction du méridien magnétique, puis on met les deux pôles de la pile en communication avec les colonnes; aussitôt on voit le circuit s'orienter et s'arrêter en croix avec sa première position, le courant se dirigeant de l'est à l'ouest dans la partie inférieure du circuit.

3° Ampère ne se borna pas à faire agir les aimants et le magnétisme terrestre sur les courants, il chercha encore si ceux-ci exerçaient les uns sur les autres des actions analogues à celles qui existent entre les aimants ; or, il trouva que « deux courants parallèles de même sens s'attirent, et que deux courants parallèles de sens contraire se repoussent ».

4° Enfin, le même physicien ayant eu l'heureuse idée de multiplier le circuit de la figure 294, en enroulant le fil métallique un grand nombre de fois en hélice, comme le montre la figure 295, donna à ce petit appareil le nom de ***solénoïde*** (semblable à des canaux). Or, lorsqu'un solénoïde est posé sur les godets de l'appareil déjà employé pour les courants mobiles (fig. 294), on observe qu'il est orienté par la terre absolument comme une aiguille aimantée. De plus, si on lui présente un aimant, la même extrémité d'un solénoïde est attirée par un pôle de l'aimant et repoussée par l'autre. Enfin, si on approche d'un solénoïde mobile un autre solenoïde parcouru aussi par un courant, on observe entre leurs extrémités, leurs ***pôles***, identiquement les mêmes attractions et les mêmes répulsions qu'entre les pôles des aimants.

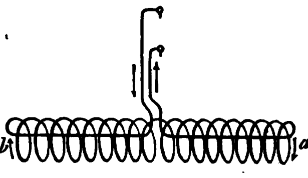


Fig. 295. — Solénoïde.

399. **Théorie d'Ampère sur le magnétisme.** — Se fondant sur les phénomènes qui viennent d'être décrits, Ampère a donné une théorie ingénieuse qui rattache à une seule et même cause le magnétisme et l'électricité. Au lieu d'expliquer les phénomènes magnétiques par l'existence de deux fluides, Ampère les a attribués à des courants électriques qui se meuvent naturellement autour des molécules des substances magnétiques, dans des plans perpendiculaires à l'axe des aimants, c'est-à-dire à la droite qui joint leurs deux pôles. Par suite, les attractions et les répulsions qui s'exercent entre les pôles des aimants ne sont plus que la conséquence des actions mutuelles des courants sur les courants, selon qu'ils sont de même sens ou de sens contraires. Quant à l'action directrice du globe sur les aimants et les courants mobiles, Ampère l'a expliquée en admettant autour de la terre des courants dirigés

parallèlement à l'équateur, de l'est à l'ouest. Ce sont ces courants terrestres qui orientent les aiguilles des boussoles, aimantent les minerais de fer, et dirigent les courants mobiles transversalement au méridien magnétique, c'est-à-dire parallèlement à leur direction. On admet que ces courants ont pour cause les variations de température qui se produisent sans cesse à la surface du globe par les alternatives successives des jours et des nuits.

400. **Multiplicateur ou galvanomètre.** — L'action directrice des courants sur l'aiguille aimantée, découverte par Œrsted, conduisit bientôt un savant prussien, Schweiger, de Hall, à la construction d'un électroscope galvanique extrêmement sensible auquel on a donné le nom de ***multiplicateur***, parce qu'il sert à multiplier l'action directrice du courant. On lui donne encore les noms de *galvanomètre* (qui mesure l'électricité galvanique), et celui de *rhéomètre* (qui mesure les courants).

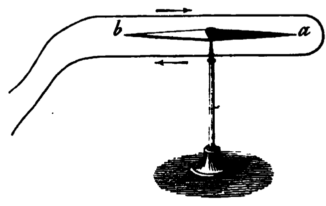


Fig. 296. — Théorie du galvanomètre.

Pour comprendre la théorie de cet instrument, considérons le cas où le courant ne passe pas seulement sur l'aiguille, comme dans la figure 293, mais passe dessus et dessous (fig. 296). L'effet est alors doublé, car au lieu d'un seul courant, on en a deux, tendant également à faire tourner le pôle austral dans le même sens, puisque chacun de ces deux courants a sa gauche tournée du même côté, comme il est facile de s'en assurer en se reportant à l'hypothèse du bonhomme d'Ampère. Or, comme en continuant à enrouler le fil dans le sens de l'aiguille on multipliera encore l'effet, on est maître de rendre la force avec laquelle le courant tend à dévier l'aiguille aussi grande qu'on voudra; et, par suite, le courant le plus faible, le plus inappréciable par tout autre moyen, pourra agir sur l'aiguille aimantée, qui servira ainsi non-seulement à constater l'existence d'un courant, mais à faire connaître le sens de sa propagation. C'est à ce double usage que sert le multiplicateur ou galvanomètre.

Cet appareil, représenté dans la figure 297, se compose d'un

pied de cuivre M sur lequel est posée une cage de verre ; sous cette cage est un cercle gradué, et en dessous de ce cercle un cadre de bois autour duquel s'enroule un grand nombre de fois un fil fin, de cuivre rouge, recouvert de soie. Les bouts de ce fil traversent le pied de cuivre et se rendent à deux boutons de même métal *m*



Fig. 297. — Galvanomètre (ou multiplicateur).

et *n*, placés au-dessous. Enfin, deux tiges verticales de laiton soutiennent un fil de cocon *s*, auquel est attachée une tige légère dans laquelle s'implantent deux petites aiguilles aimantées, l'une *ab* au-dessus du cadran, l'autre B, qui n'est visible qu'en partie, est dans le circuit même formé par l'enroulement du fil. Ces deux aiguilles, qui ne peuvent tourner l'une sans l'autre, sont disposées de manière que leurs pôles contraires soient en regard, c'est-à-dire le pôle austral *a* de la première au-dessus du pôle boréal B de la seconde. De là deux effets importants : d'abord, le magnétisme terrestre tendant à diriger ces deux aiguilles en sens contraires, il en résulte que si elles sont à peu près de même force, l'action directrice de la terre est presque nulle, et que, par suite,

une très-petite force suffira pour faire dévier les aiguilles hors du méridien magnétique; de plus, par l'emploi de deux aiguilles, l'appareil gagne beaucoup en sensibilité, parce que le courant qui parcourt le circuit au-dessous du cercle gradué agit sur l'une et sur l'autre pour les faire tourner dans le même sens; ce qui est une conséquence de l'hypothèse du bonhomme d'Ampère (397).

401. **Usages du multiplicateur.** — D'après la description qui précède, on conçoit que le multiplicateur doit être un instrument extrêmement sensible pour accuser l'existence des courants même les plus faibles. C'est, en effet, à l'aide de cet instrument que M. Becquerel a constaté la production de courants électriques dans toutes les actions chimiques, dans l'imbibition des liquides et dans beaucoup d'autres phénomènes. On a pu même en reconnaître l'existence dans les végétaux et dans les animaux; mais alors, au lieu d'un circuit de cinq à six cents tours qu'on emploie ordinairement, il a fallu des galvanomètres dont le fil en faisait jusqu'à vingt mille.

Pour constater avec le multiplicateur les courants développés dans les réactions chimiques, par exemple dans l'action des acides sur les métaux, on engage deux fils de platine dans les boutons *m* et *n* (fig. 297), puis faisant plonger le bout de l'un d'eux dans un verre rempli d'eau acidulée avec de l'acide sulfurique, on met l'autre fil en contact avec une lame de zinc qu'on tient à la main, et on plonge cette lame dans le verre. Les deux aiguilles, qui étaient d'abord parallèles au diamètre *oi* qu'on a soin de placer d'avance dans le méridien magnétique, se dirigent aussitôt perpendiculairement à ce méridien; ce qui indique la production instantanée d'un courant. De plus, d'après l'orientation que prend le pôle austral de chaque aiguille, on reconnaît que ce courant est dirigé dans le sens marqué par les flèches; d'où l'on conclut que l'eau acidulée s'est électrisée positivement et la lame de zinc négativement; ainsi se trouve vérifié ce qui a été dit dans la théorie des piles, que lorsqu'un acide se combine à un métal, toujours ce dernier prend l'électricité négative, et l'acide l'électricité positive.

402. **Aimantation par les courants.** — L'expérience d'Œrsted ayant montré que le courant voltaïque agit inversement sur les deux pôles de l'aiguille aimantée, en dirigeant l'un d'eux à gauche

et l'autre à droite, il était présumable qu'un courant dirigé transversalement à un barreau d'acier ou de fer, devait en séparer les deux fluides magnétiques, et le transformer en aimant. C'est, en effet, une des premières tentatives qui furent faites par Ampère et Arago, et le résultat vérifia leur prévision. Ils enroulèrent un fil de cuivre en hélice autour d'un barreau d'acier, comme le montre la figure 298, et en faisant passer un courant dans ce fil, le barreau fut aimanté instantanément. Le même effet se produit avec un barreau de fer doux, mais l'aimantation n'est que temporaire;

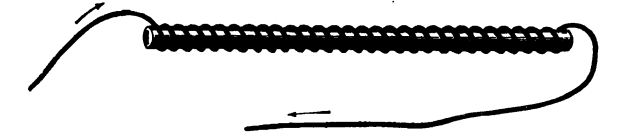


Fig. 298. — Aimantation par les courants.

lorsque le courant ne passe plus dans le fil, le fer, qui n'a pas de force coercitive (332), revient instantanément à l'état naturel.

On peut aussi aimanter un barreau d'acier en faisant passer, dans le fil de la figure 298, non plus un courant voltaïque, mais la décharge d'une bouteille de Leyde; ce qu'on obtient en faisant toucher l'un des bouts du fil à l'armature extérieure et l'autre bout à l'armature intérieure. Le barreau est ainsi instantanément aimanté; ce qui prouve l'identité de l'électricité des machines électriques avec celle de la pile.

CHAPITRE XI

ÉLECTRO-AIMANTS, TÉLÉGRAPHES ET MOTEURS ÉLECTRIQUES.

403. **Électro-aimants.** — Les *électro-aimants* sont des aimants extrêmement puissants qu'on obtient, comme leur nom l'indique, au moyen de l'électricité. Ils se composent d'un barreau cylindrique de fer doux, recourbé en fer à cheval (fig. 299). Sur chaque

branche s'enroule un grand nombre de fois un fil de cuivre recouvert de soie, de manière à former deux fortes bobines sur lesquelles l'enroulement a lieu en sens contraire. Aussitôt qu'un courant un peu énergique passe dans le fil, le fer s'aimante et devient un aimant très-puissant; mais dès que le courant est interrompu, tout signe d'aimantation disparaît (402).



Fig. 299. — Électro-aimant.

La force des électro-aimants dépend de leurs dimensions, du nombre de tours du fil et de l'énergie du courant. Il ne faut pas un électro-aimant extrêmement puissant pour porter une personne, comme on le voit dans la figure 300. On en construit qui portent jusqu'à quatorze ou quinze personnes, et on pourrait en construire qui porteraient bien davantage. Ces appareils ont reçu d'importantes applications dans les télégraphes, les horloges et les moteurs électro-magnétiques.

404. **Télégraphes électriques.** — Les *télégraphes électriques* sont des appareils dans lesquels on applique les courants voltaïques à la transmission des signaux, non-seulement à des distances considérables, mais avec une prodigieuse vitesse.

Dès le siècle dernier, on avait pensé à utiliser la vitesse de propagation du fluide électrique pour correspondre d'une extrémité à l'autre d'un fil conducteur. Lorsque Œrsted eut fait connaître l'action directrice des courants sur l'aiguille aimantée, Ampère proposa, en 1820, de transmettre des signaux au moyen de courants qu'on ferait passer dans des fils métalliques au-dessus d'aiguilles aimantées, en faisant usage d'autant d'aiguilles et de fils qu'il y a de lettres. M. Steinheil, à Munich, construisit, en 1837, un télégraphe de ce genre; mais les télégraphes électriques ne purent acquérir la précision et la simplicité qu'ils ont aujourd'hui que lorsqu'on les fit marcher à l'aide d'électro-aimants, application dont l'initiative est due à M. Wheatstone, à Londres, en 1840.

Depuis lors, on a beaucoup varié le mécanisme des télégraphes

électriques, et il faudrait des volumes pour décrire tous les appareils qui ont été construits. Cependant, on peut les rapporter à trois genres principaux : les télégraphes à lettres, à signaux, et enregistreurs. Tous sont fondés sur le même principe, qui est fort



Fig. 300. — Personne portée par un électro-aimant.

simple : à la station qui envoie la dépêche est une pile, à celle qui la reçoit est un électro-aimant, et ces deux appareils sont reliés l'un à l'autre par un fil métallique qui va de la première station à la seconde. Lorsque le courant passe dans le fil, l'électro-aimant fonctionne et attire une armature de fer doux qui transmet son mouvement à d'autres pièces servant de signaux. Dès que le courant ne passe plus, un ressort ramène l'armature à sa première position; en sorte que c'est en établissant et en interrompant suc-

cessivement le courant à la station de départ que la dépêche est transmise.

Dans le télégraphe à lettres, l'électro-aimant fait marcher une aiguille sur un cadran portant les vingt-quatre lettres; celle devant laquelle s'arrête l'aiguille est la lettre transmise; c'est-à-dire que chaque mot exige autant de signaux qu'il contient de lettres.

Dans le télégraphe à signaux, il y a deux électro-aimants faisant marcher, sur un cadran blanc, deux indicateurs mobiles aux extrémités d'un trait noir horizontal et fixe. Ce sont les positions relatives de ces indicateurs, par rapport à la ligne fixe, qui servent de signaux conventionnels, à peu près comme dans les anciens télégraphes en usage avant les télégraphes électriques.

Le télégraphe à lettres, construit par M. Bréguet, est celui qui fonctionne sur toutes nos lignes de chemins de fer. Quant au télégraphe à signaux, il a d'abord été employé par l'État, mais on lui substitue partout aujourd'hui celui de Morse.

405. **Télégraphe enregistreur de Morse.** — Ce télégraphe, inventé en 1837, en Amérique, offre, sur les précédents, le précieux avantage de conserver sur papier la trace des dépêches, ce qui en permet le contrôle. La figure 301 représente un poste télégraphique envoyant une dépêche à l'aide de cet appareil, et la figure 302 le poste qui la reçoit. Dans chaque poste l'appareil est identique; mais il est double, se composant de deux pièces distinctes : le *manipulateur* qui transmet les signaux, et le *récepteur* qui les enregistre. Ces deux pièces sont représentées plus en grand dans les figures 303 et 304.

Pour faire comprendre comment fonctionnent ces appareils, commençons par la figure 301. Au-dessous de la table portant le télégraphe est la pile qui fournit le courant; celui-ci, conduit par le fil P, entre dans le manipulateur que nous décrirons ci-après; de là il se rend dans un petit galvanomètre *g*, qui indique par l'orientation de son aiguille si le courant est transmis. Enfin, le courant arrive à une pièce M, qui sert de paratonnerre, ainsi qu'on le verra ci-dessous, et de là gagne le fil L, qui est le *fil de ligne*, c'est-à-dire celui qui est établi sur des poteaux le long des lignes des chemins de fer.

On voit ce fil reparaître au haut de la figure 302, où le courant

qui arrive passe de nouveau dans un paratonnerre, puis dans un galvanomètre, et enfin dans le manipulateur, d'où il se rend dans l'électro-aimant faisant partie du récepteur. En sortant de celui-ci, il va se perdre dans le sol par un fil T, qui le conduit ordinairement dans un puits.



Fig. 301. — Télégraphe électrique (poste expédiant).

406. **Manipulateur et récepteur de Morse.** — La disposition générale de l'appareil une fois connue, voici comment fonctionnent le manipulateur et le récepteur : le premier se compose d'un socle de bois sur lequel est un levier métallique *kh*, mobile sur un axe horizontal (fig. 303). D'un bout, ce levier est soulevé par une lame élastique *r*; de l'autre, il est traversé par une tige *a*, qui s'appuie sur un bouton de cuivre en communication, à l'intérieur

du socle, avec le fil A. La figure 303 représente le manipulateur au moment où il reçoit la dépêche, c'est-à-dire tel qu'il fonctionne dans la figure 302. Le courant arrive alors par le fil L, qui est le fil de ligne, monte dans le levier *kh*, et redescend par la tige *a* dans le fil A, qui le conduit au récepteur. Si, au contraire,

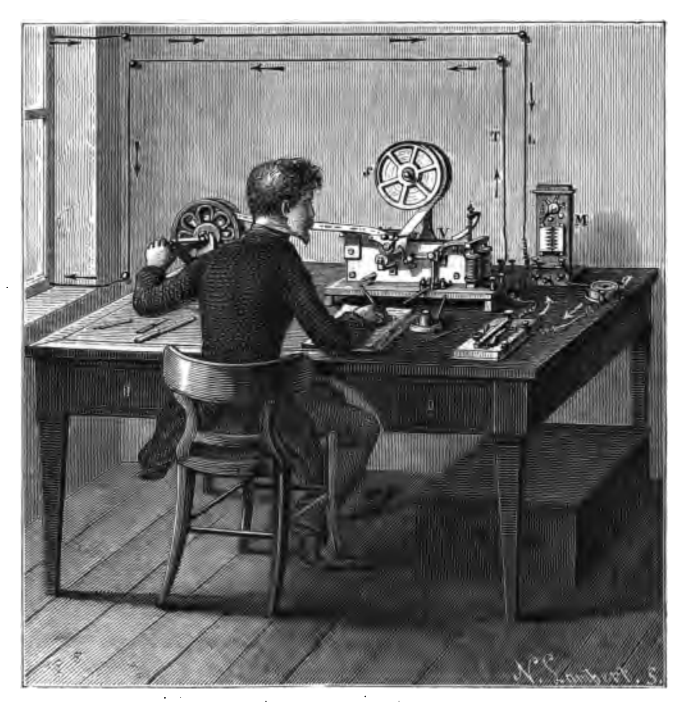


Fig. 302. — Télégraphe électrique (poste recevant).

on veut que le manipulateur transmette le courant pour envoyer une dépêche, comme cela a lieu dans la figure 301, il faut que le courant qui vient de la pile par le fil P, puisse entrer dans le manipulateur; or, c'est ce qui ne se produit pas lorsqu'il est disposé comme dans la figure 303, où l'on voit que le levier *kh* ne touche pas le bouton métallique auquel aboutit le fil P. Mais si, appuyant le doigt sur le bouton B, on abaisse le levier *hk*, le contact s'établit

et le courant P passe aussitôt dans le fil L, qui le conduit au poste auquel on écrit; car c'est le même fil qui transmet le courant et le reçoit d'un poste à l'autre.

Quant au récepteur (fig. 304), il se compose d'un électro-aimant E, qui, toutes les fois que le courant est transmis, agit par attrac-

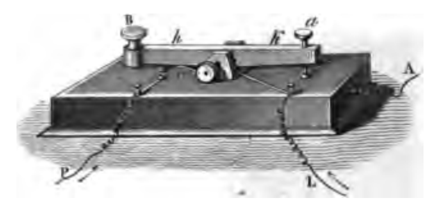


Fig. 303. — Manipulateur du télégraphe de Morse.

tion sur une armature de fer doux *m*, fixée à l'extrémité d'un levier *mn* mobile sur un axe. A son extrémité *n*, ce levier porte un poinçon *s*, qui appuie sur une bande de papier *ab*. Quand le courant ne passe pas dans l'électro-aimant, le poinçon ne porte pas sur le papier; mais dès que l'électro-aimant fonctionne, l'ar-

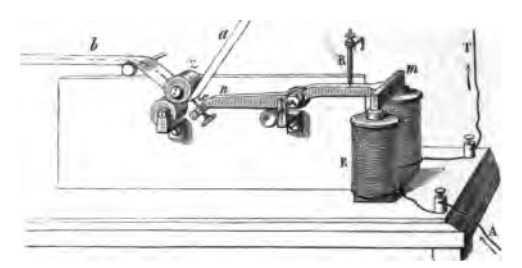


Fig. 304. — Récepteur du télégraphe de Morse.

mature *m* est attirée, le levier bascule, et le poinçon presse le papier, sur lequel il trace un trait allongé, ou simplement un point, selon que le courant passe pendant un temps plus ou moins long.

Afin que les signaux ainsi marqués par le poinçon ne se confondent pas, la bande de papier est entraînée lentement par un cylindre *z*, qui est mû par un mouvement d'horlogerie V (fig. 301).

Quant aux traits et aux points tracés sur la bande de papier pendant son mouvement progressif, ils dépendent de l'employé qui fait marcher le manipulateur (fig. 301), car il n'a qu'à presser un peu plus ou un peu moins longtemps sur le bouton B.

Il restait à donner une signification conventionnelle aux combinaisons qu'on peut former avec des traits et des points. C'est ce qu'on a fait de la manière suivante :

ALPHABET DE MORSE.

· —	a	· ·	i	· — ·	r
· — · —	ä	· — — —	j	· · ·	s
— · · ·	b	— · —	k	—	t
— · — ·	c	· — · ·	l	· · —	u
— · ·	d	— —	m	· · — —	ü
·	e	— ·	n	· · · —	v
· · — · ·	é	— — —	o	· — —	w
· · — ·	f	— — — ·	ö	— · · —	x
— — ·	g	· — — ·	p	— · — —	y
· · · ·	h	— — · —	q	— — · ·	z

Lorsqu'on assiste à l'envoi ou à la réception d'une dépêche dans un poste télégraphique, on est étonné de la promptitude et de la précision avec lesquelles les employés lisent et transmettent les signaux.

Pour compléter la description qui précède, il nous reste à faire connaître l'usage du paratonnerre M (fig. 301). L'expérience ayant appris que sous l'influence des nuées orageuses il s'accumule dans les fils électriques des quantités d'électricité suffisantes pour donner des étincelles redoutables à ceux qui font marcher les appareils, c'est cet accident que le paratonnerre est destiné à prévenir. A cet effet, il se compose de deux pièces métalliques dentées comme des scies, et disposées l'une à côté de l'autre de manière que les pointes des dents soient presque en contact. Cela posé, à l'arrivée et au départ, le courant passe dans une de ces plaques, tandis que l'autre est en communication directe avec la terre. Par suite, si, par l'influence d'un nuage orageux, l'électricité s'accumule dans les fils et dans les appareils, elle se dégage par les pointes sur la

plaque qui communique au sol, et perdant ainsi sa tension, toute explosion est évitée.

Dans tout ce qui précède, on n'a considéré qu'un seul fil L, allant du poste d'où part le courant (fig. 301) à celui qui le reçoit (fig. 302). Il semble qu'il en faudrait un second destiné à fermer le courant, c'est-à-dire à le ramener de la figure 302 au pôle négatif de la pile (fig. 301). Or, on évite l'emploi de ce deuxième fil, en faisant, à un bout de la ligne, plonger dans un puits le fil T (fig. 301) qui part du pôle négatif de la pile, et à l'autre bout le fil T (fig. 302) par lequel le courant sort du récepteur. Les fluides positif et négatif des pôles se perdant alors dans le sol, le courant continue à circuler d'un pôle à l'autre, comme s'il était ramené par la terre.

407. **Rapidité de la transmission, fils sous-marins.** — L'expérience a fait voir que le fluide électrique se transmet dans les fils télégraphiques avec la prodigieuse vitesse de 172 000 kilomètres par seconde; ce qui revient à dire que l'électricité ferait plus de quatre fois le tour de notre globe en une seconde. On conçoit dès lors que la transmission des dépêches peut être regardée comme instantanée, et l'intervalle qu'elle exige dans la pratique ne provient pas du temps nécessaire à la propagation du fluide électrique, mais de celui qu'exige la manipulation des appareils.

Quoique bien récent, le télégraphe électrique est déjà d'un usage général en Europe et dans l'Amérique du Nord. Non-seulement un immense réseau métallique parcourt en tous sens ces deux continents, mais des fils sous-marins unissent l'Angleterre à l'Irlande, à la Hollande et à la France. Malte, la Sardaigne, Alger, communiquent de même avec les ports français de la Méditerranée.

Enfin, la plus belle conquête remportée jusqu'ici par l'électricité est la réunion toute récente de l'Amérique à l'Europe par un fil métallique recouvert de gutta-percha; plongeant à des profondeurs inconnues, ce fil part de Valentia, à l'extrémité de l'Irlande, et se termine à Placentia, à l'extrémité de Terre-Neuve. Beaucoup de savants refusaient de croire à la réalisation d'une aussi gigantesque entreprise, et regardaient comme impossible que l'électricité se transmît à une aussi grande distance. Mais aujourd'hui le fait est accompli, le courant se propage sur un parcours de 800 lieues, et

les signaux sont transmis; seulement, la vitesse de propagation est moindre que dans les fils télégraphiques ordinaires. De même qu'on a dit à une autre époque « il n'y a plus de Pyrénées », on peut donc dire désormais, avec plus de vérité, « il n'y a plus d'Atlantique. »

408. **Moteurs électro-magnétiques.** — Un grand nombre de physiciens ont essayé d'utiliser la force attractive des électro-aimants comme force motrice. M. Jacobi, à Saint-Pétersbourg, paraît être le premier qui ait construit une machine de cette espèce, avec laquelle, en 1838, il put faire remonter la Newa à une chaloupe portant douze personnes. Depuis, on a varié extrêmement la forme de ces machines; mais, dans toutes, la consommation en zinc et acide de la pile qui les fait marcher, l'emporte de beaucoup, à force égale, sur la dépense du combustible dans les machines à vapeur.

La figure 305 représente une machine électro-magnétique dont le dessin a été pris dans les ateliers de M. Froment. Elle se compose de quatre électro-aimants agissant, par couple de deux, sur deux pièces de fer doux P, dont une seule est visible dans la figure. Cette pièce, attirée par les électro-aimants EF, transmet le mouvement, au moyen d'une bielle, à une manivelle *m* fixée à l'extrémité d'un arbre métallique horizontal. Celui-ci porte une grande roue de fonte qu'on nomme *volant*, et qui sert à régulariser le mouvement de rotation. Enfin, sur le même arbre est une pièce *n* de métal, d'un plus fort diamètre, dont on va voir ci-après la fonction.

Cela posé, le courant de la pile entrant en A, passe dans une plate-forme B, de fonte; puis, par différentes pièces métalliques, gagne l'arbre et la pièce métallique *n*, que nous venons de considérer. De là, le courant doit se porter alternativement sur le premier couple d'électro-aimants EF, puis, sur le second *ef*. Pour comprendre comment s'opère ce changement dans la marche du courant, reportons-nous à la figure 306 qui représente une section de la pièce *n* et de ses accessoires. Sur cette pièce *n* est une partie saillante *e* qu'on nomme *camme*, et qui, pendant une révolution complète, touche successivement deux palettes *a* et *b*; celles-ci sont destinées à transmettre aux électro-aimants le courant qui se propage dans le sens indiqué par les flèches sans plumes, celles qui sont garnies de plumes marquant, non pas la direction du courant,

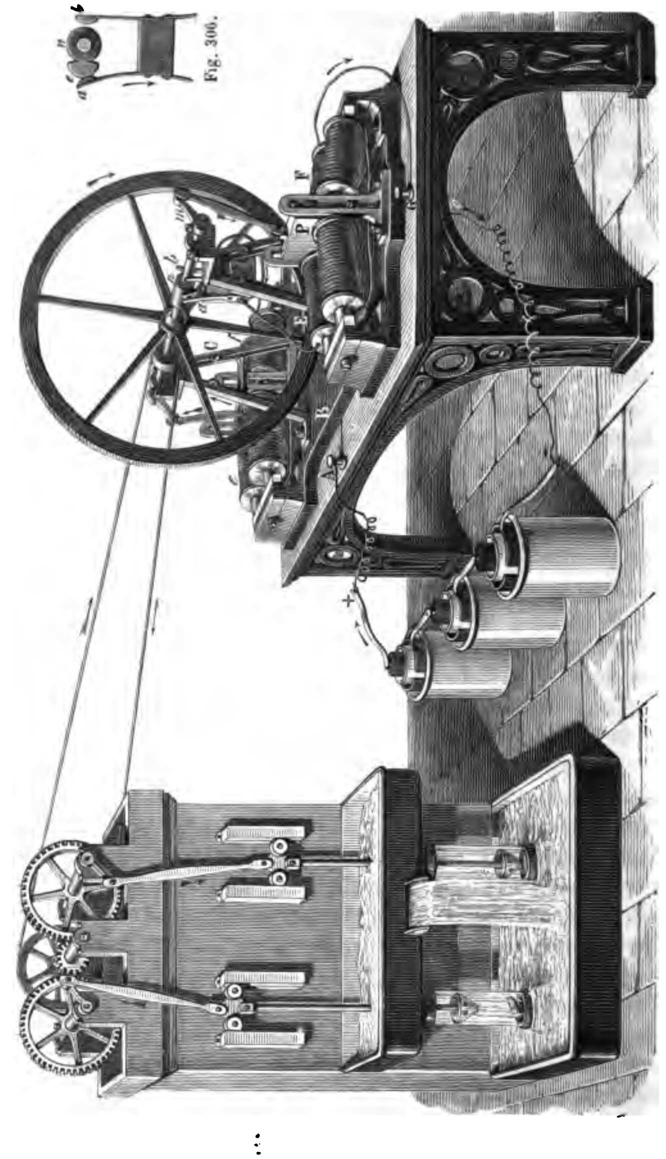


Fig. 306.

Fig. 305. — Moteur électro-magnétique de M. Froment.

mais le sens suivant lequel se meuvent les pièces de la machine.

Ces détails connus, on voit que le courant passant alternativement dans les deux palettes *a* et *b*, et de là dans les deux systèmes d'électro-aimants EF et *ef*, la pièce P est d'abord attirée, puis ensuite une pièce semblable placée à l'autre extrémité de l'arbre du volant. De là résulte un mouvement circulaire continu, qui se transmet par une courroie sans fin à un système d'engrenages qui font marcher deux pompes élévatoires.

Quand on visite les belles galeries de M. Froment, rien n'est curieux comme ces moteurs, ces télégraphes, ces horloges électriques, communiquant tous par une série de fils à un appareil voltaïque, et n'attendant qu'une communication électrique, réglée au loin par le doigt du maître, pour entrer en mouvement ou s'arrêter avec une admirable précision. Pour ceux qui ne sont pas familiarisés avec les phénomènes des courants, c'est à se croire transporté dans la demeure de quelque habile magicien.

CHAPITRE XII

COURANTS D'INDUCTION, APPLICATION A LA THÉRAPEUTIQUE, POISSONS ÉLECTRIQUES.

409. **Induction par les courants.** — On a vu la machine électrique en activité agir par influence sur les corps à l'état neutre (350), et développer dans ces corps les propriétés électriques. Or, les courants de la pile produisent des effets analogues, mais « seulement à l'instant où ils commencent et à celui où ils cessent ».

Pour le constater, on prend deux fils de cuivre recouverts de soie qu'on enroule l'un à côté de l'autre un grand nombre de fois sur une bobine; puis, fixant les deux bouts de l'un d'eux aux boutons du galvanomètre (fig. 297), on attache une des extrémités du deuxième fil au pôle d'une pile faible, et on fait toucher l'autre extrémité au second pôle. Or, à chaque fois que le courant commence à passer dans le fil qui réunit les deux pôles, l'aiguille du galvanomètre indique, par le sens de sa déviation, qu'il se produit dans l'autre fil un courant de sens contraire à celui de la pile. L'aiguille

revient ensuite à sa position primitive, et s'y maintient tant que continue le courant de la pile, ce qui prouve qu'alors il n'y a plus de courant dans le fil qui va au galvanomètre. Enfin, si l'on interrompt le courant, l'aiguille est déviée de nouveau, mais dans la direction opposée, ce qui indique qu'il se produit actuellement un courant de direction contraire à celle du premier.

Dans cette expérience, le courant de la pile a reçu le nom de *courant inducteur*, et celui qui prend naissance dans le second fil est appelé *courant d'induction* ou *courant induit*. D'après ce qui précède, on peut formuler ainsi l'action des courants inducteurs :

« 1° A l'instant où le courant inducteur commence, il se produit dans le fil voisin un courant induit de sens contraire au premier; 2° tant que le courant inducteur continue, il ne se manifeste aucun phénomène dans le second fil; 3° enfin, lorsque le courant inducteur cesse, un courant induit se développe de nouveau dans le fil voisin, mais alors de même sens que le courant inducteur. »

410. **Propriétés des courants d'induction, effets physiologiques.** — Les courants d'induction forment aujourd'hui une branche importante de la physique, due presque tout entière à M. Faraday, illustre physicien anglais.

L'expérience a fait voir que les courants d'induction possèdent toutes les propriétés des courants voltaïques étudiés jusqu'ici. Comme eux, ils donnent des étincelles, produisent des commotions musculaires violentes, décomposent l'eau et les sels, agissent sur l'aiguille aimantée.

Comme les effets des courants induits sont d'autant plus puissants que les fils sont prolongés davantage l'un à côté de l'autre, on dispose ordinairement les appareils d'induction sous la forme de bobine, comme celle représentée dans la figure 307. Elle se compose d'un cylindre de carton sur lequel s'enroule un fil de cuivre un peu gros, faisant environ trois cents tours. Par-dessus, s'enroule un fil plus fin, qui fait plusieurs milliers de tours. Ces fils sont non-seulement recouverts de soie avec soin, mais d'un vernis à la gomme laque destiné à les isoler entre eux. Deux petites bornes de cuivre placées à gauche, sur la planchette qui porte la bobine, sont en communication avec les pôles d'une pile.

De la borne la plus à gauche part une lame de cuivre qui se rend à une petite roue dentée, mue par un mouvement d'horlogerie et communiquant avec l'un des bouts du gros fil de la bobine. L'autre bout du même fil se prolonge sur la planchette jusqu'à la seconde

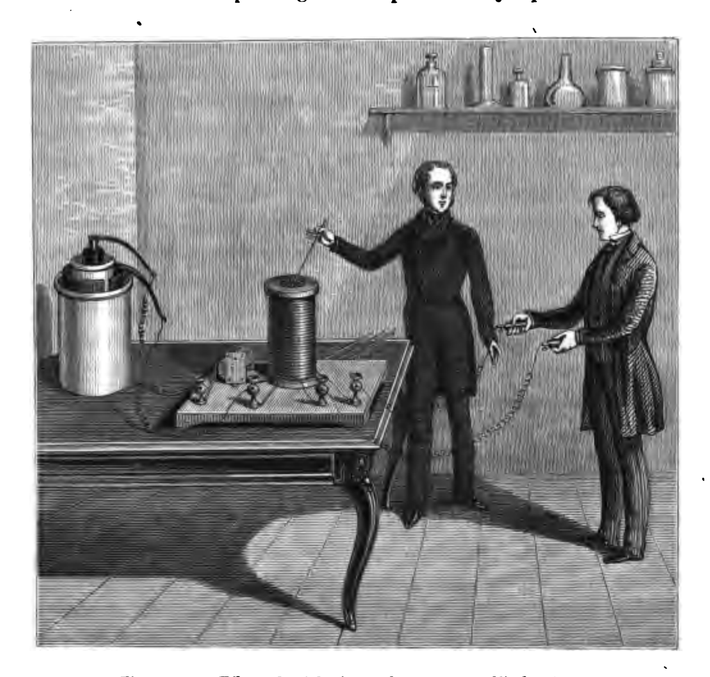


Fig. 307. — Effets physiologiques des courants d'induction.

borne. Enfin, sur la droite, sont deux autres bornes auxquelles aboutissent les deux extrémités du fil fin qui recouvre le premier; et des mêmes bornes partent deux autres fils qui représentent les prolongements du fil induit. Pour avoir des commotions, on termine ces deux derniers fils par des cylindres de cuivre qu'on prend dans les mains, comme le montre la figure.

Cela posé, le courant de la pile n'arrivant au gros fil de la bobine qu'après avoir passé dans le mouvement d'horlogerie, il en résulte que toutes les fois que la petite lame élastique qui s'appuie sur la

roue dentée, touche une de ses dents, le courant passe ; mais que chaque fois que la lame saute d'une dent à la suivante, le courant est interrompu. Il ne passe donc que par intermittences dans le gros fil, et ce sont ces intermittences qui donnent naissance à des courants d'induction alternativement de sens contraire dans le fil fin qu'on tient à la main.

Les commotions données par ces courants ne sont pas égales : le courant induit qui se produit à l'instant où le courant inducteur s'établit, ne donne que des commotions presque nulles; tandis que celles qui se produisent à chaque rupture du courant inducteur sont extrêmement fortes. On gradue ces commotions au moyen de petites baguettes de fer doux qu'on place progressivement dans l'intérieur de la bobine. Ces baguettes, s'aimantant et se désaimantant constamment par suite des intermittences du courant inducteur, agissent à leur tour par induction sur le courant induit, et augmentent beaucoup l'intensité des commotions au moment de la rupture du courant inducteur.

411. Application thérapeutique de l'électricité. — Aussitôt après l'invention de la machine électrique, on tenta d'appliquer l'électricité au traitement de certaines maladies. On tira d'abord des étincelles du corps des malades en approchant ceux-ci du conducteur d'une machine électrique en activité; plus tard, on isola les malades sur un tabouret à pieds de verre, et les faisant communiquer à la machine, on les frictionna avec des brosses formées de nombreux fils de métal, afin de multiplier les étincelles. On parvint ainsi, sinon à guérir, au moins à améliorer l'état de quelques malades, surtout dans les cas de paralysie. Cependant, l'application médicale de l'électricité était à peu près abandonnée lorsqu'on pensa à l'utiliser sous forme de courants voltaïques, puis de courants d'induction, état sous lequel elle est très en usage aujourd'hui.

Les premiers essais d'application de l'électricité galvanique à la thérapeutique sont dus à M. de Humboldt, l'illustre doyen des physiciens de notre époque, qui fit à ce sujet, dès la fin du siècle dernier, de nombreuses expériences sur lui-même et sur des animaux. Entre autres expériences, il rapporte qu'ayant attendu qu'une linotte fût près d'expirer, lorsqu'elle était déjà étendue sur le dos,

sans mouvement et complétement insensible à la piqûre d'une aiguille, il plaça une petite lame de zinc dans le bec et un fil d'argent dans le rectum, puis établit la communication entre les deux métaux. « Quel fut mon étonnement, écrit-il, lorsqu'au moment du contact, l'oiseau ouvrit les yeux et se redressa sur ses pattes en battant des ailes! Il respira de nouveau pendant six ou huit minutes et expira ensuite tranquillement. »

Cette expérience et beaucoup d'autres prouvent combien l'électricité agit puissamment sur l'économie animale. On a peu essayé d'appliquer cet agent sous la forme de courant continu, comme l'a fait M. de Humboldt dans l'expérience ci-dessus, mais beaucoup plus sous la forme de courant interrompu, qu'on administre, en général, à l'aide de machines d'induction. Ces machines sont de deux sortes : les unes fonctionnent sans pile, et le courant y est développé par l'induction d'un fort barreau aimanté, qui tourne devant deux bobines de fil de cuivre recouvert de soie et enroulé sur un cylindre de fer doux en fer à cheval, à la manière des électro-aimants. Le fer s'aimantant et se désaimantant à chaque révolution du barreau, il agit par induction sur le fil des bobines, et y développe un courant induit alternativement de sens contraire. Dans les autres machines d'induction, le courant inducteur est dû à une pile à charbon, comme dans la bobine déjà décrite (fig. 307).

La figure 308 représente une machine de cette espèce, imaginée par le docteur Duchenne (de Boulogne) et employée par lui dans sa pratique. Elle se compose d'une petite caisse de bois sur laquelle est fixé un cylindre de cuivre qui renferme une bobine à deux fils. Dans la caisse est un tiroir de zinc où se trouve une légère couche d'eau salée, et dans cette dissolution plonge une plaque de charbon de coke bien calciné et imprégné d'acide azotique; c'est-à-dire que le tout représente un couple de la pile de Bunsen légèrement modifié. Deux lames de cuivre communiquant l'une avec le zinc, l'autre avec le charbon, conduisent le courant au gros fil de la bobine, mais après qu'il a passé dans un interrupteur produisant le même effet que le mouvement d'horlogerie dans l'appareil de la figure 207. Cet interrupteur consiste en une petite lame de fer doux qui est attirée par un électro-aimant placé au centre de la bobine. Cette lame étant attirée toutes les fois que le courant passe, l'inter-

rompt aussitôt. Quant au fil induit, il sort de l'appareil et vient par ses deux bouts s'adapter à deux godets de cuivre, munis de manches de verre que l'expérimentateur tient à la main. Ces godets sont creux et garnis, à leur partie inférieure, d'éponges humectées avec de l'eau salée ou de l'eau ordinaire, suivant qu'on veut éta-



Fig. 308. — Application thérapeutique de l'électricité.

blir plus ou moins intimement la conductibilité du courant sur les parties en contact avec ces éponges. Le dessin ci-dessus montre comment on s'y prend pour faire passer ainsi le courant dans un membre malade.

On a obtenu de bons effets de l'électricité dans plusieurs affections nerveuses, particulièrement dans celles de la vue et dans les névralgies; mais c'est surtout dans les cas de paralysie que les courants électriques ont donné les résultats les plus satisfaisants. Ils ont aussi été appliqués au traitement des anévrismes par M. Pétrequin, à Lyon. Dans tous les cas, il importe de ne se faire électriser que par des praticiens familiarisés avec les effets de l'électricité dans les diverses affections. Car si elle est souvent sans

effet, elle n'est pas toujours inoffensive. Mal appliquée ou appliquée mal à propos, elle a déjà plusieurs fois accasionné des effets fâcheux.

412. **Poissons électriques.** — Nous terminerons ici l'étude des phénomènes électriques en faisant connaître une source d'électricité fort curieuse : c'est l'électricité animale qu'on observe dans certains poissons possédant la faculté de donner à volonté, à ceux qui les irritent, des commotions extrêmement violentes, comparables à celles que donnerait une batterie de plusieurs bocaux.

Ces poissons comprennent trois espèces : la torpille, le gymnote et le silure. La plus connue est la torpille, espèce de raie, qu'on trouve dans la Méditerranée. Lorsqu'on la tient à la main, elle donne ses décharges dans l'air comme dans l'eau; elles sont si intenses et se répètent avec une telle rapidité qu'il est impossible de les supporter. Toutefois, l'animal s'épuise, et il faut non-seulement le remettre dans l'eau salée, mais lui laisser un certain temps de repos, pour que ses fonctions électriques se rétablissent.

Le gymnote, ou anguille de Surinam, a été étudié, par MM. Humboldt et Bompland, dans l'Amérique du Sud. C'est une espèce d'anguille qu'on pêche de la manière suivante. Les Indiens réunissent des chevaux sauvages qu'ils amènent de la savane voisine, et les forcent à entrer dans les marais où se tiennent les gymnotes. Ceux-ci, effrayés par le piétinement des chevaux, se défendent par des décharges réitérées. Plusieurs chevaux, étourdis par la violence des commotions, disparaissent sous l'eau et succombent. D'autres, haletant, la crinière hérissée, les yeux hagards et exprimant l'angoisse, cherchent à fuir; mais ils sont repoussés par les Indiens. Cependant, peu à peu l'impétuosité de ce combat inégal diminue; les gymnotes épuisés se dispersent, et il leur faut un long repos et une nourriture abondante pour réparer ce qu'ils ont perdu de force galvanique. Ils s'approchent alors timidement du bord des marais, où on les prend au moyen de petits harpons attachés à de longues cordes.

Les commotions que donnent ces différentes espèces de poissons ont bien une origine électrique. En effet, M. Matteucci, qui a fait une étude complète de la torpille, a pu non-seulement en tirer des étincelles, mais il a vu l'aiguille du galvanomètre dévier lors-

qu'on mettait l'un des bouts du fil en contact avec le dos de l'animal, l'autre avec l'abdomen. Enfin, il a pu aimanter un petit barreau d'acier placé au centre d'une hélice dans laquelle il faisait passer la décharge d'une torpille. Dans tous les cas, la commotion que lance l'animal est volontaire; on la détermine en l'irritant en un point de son corps, et surtout en pinçant ses nageoires. Quant à l'organe où l'électricité prend naissance, M. Matteucci a reconnu que, dans la torpille, il est double et placé des deux côtés de la tête. Chez le gymnote, c'est dans la queue que se trouve l'organe électrique.

FIN.

TABLE DES MATIÈRES

LIVRE PREMIER.

PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES ET ATTRACTION UNIVERSELLE.

LIVRE II.

DES LIQUIDES.

LIVRE III.

DES GAZ.

LIVRE IV.

ACOUSTIQUE.

LIVRE V.

DU CALORIQUE.

LIVRE VI.

DE LA LUMIÈRE.

LIVRE VII.

MAGNÉTISME.

LIVRE VIII.

ÉLECTRICITÉ.

ÉLECTRICITÉ VOLTAIQUE.

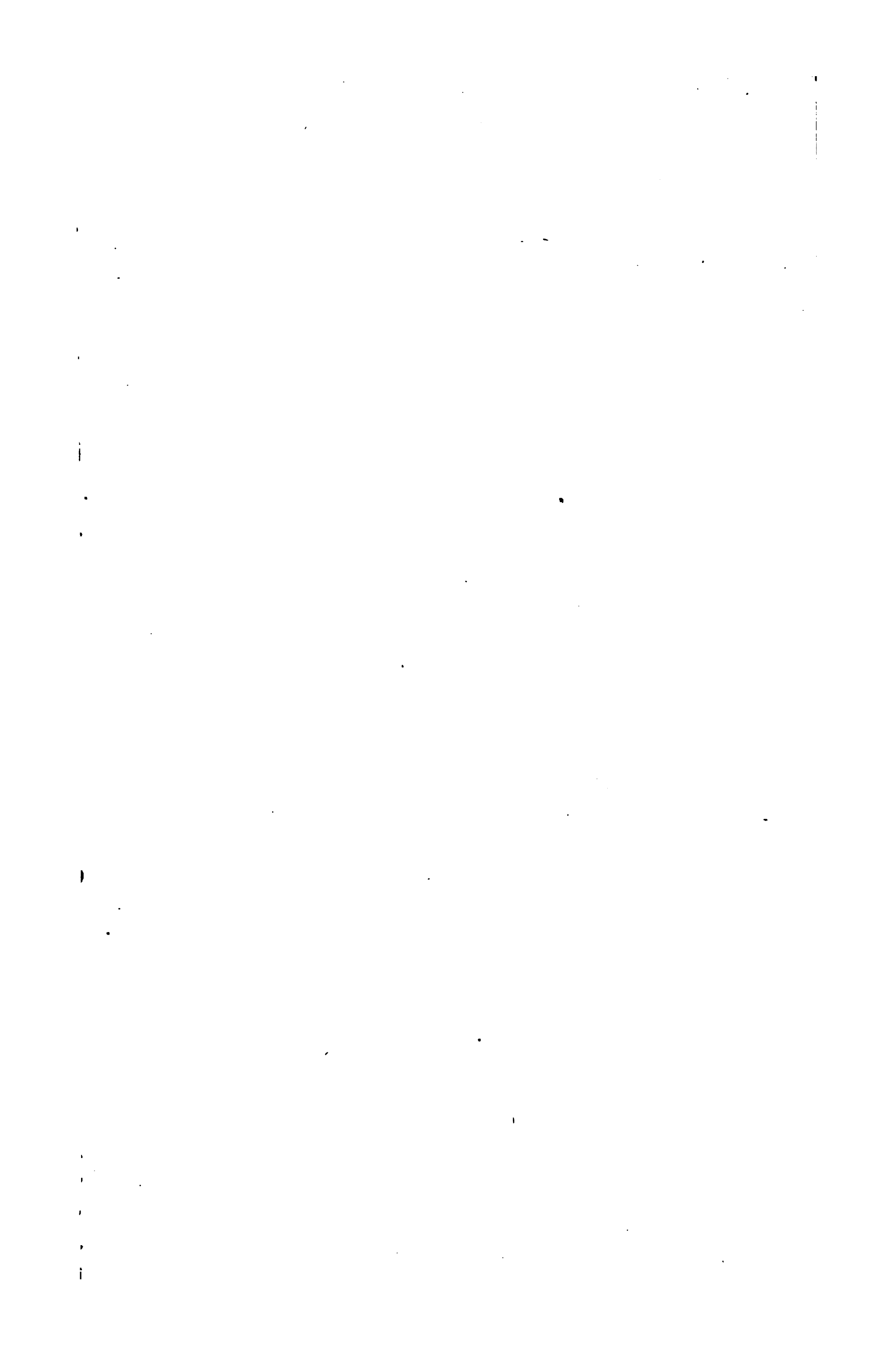
FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES.

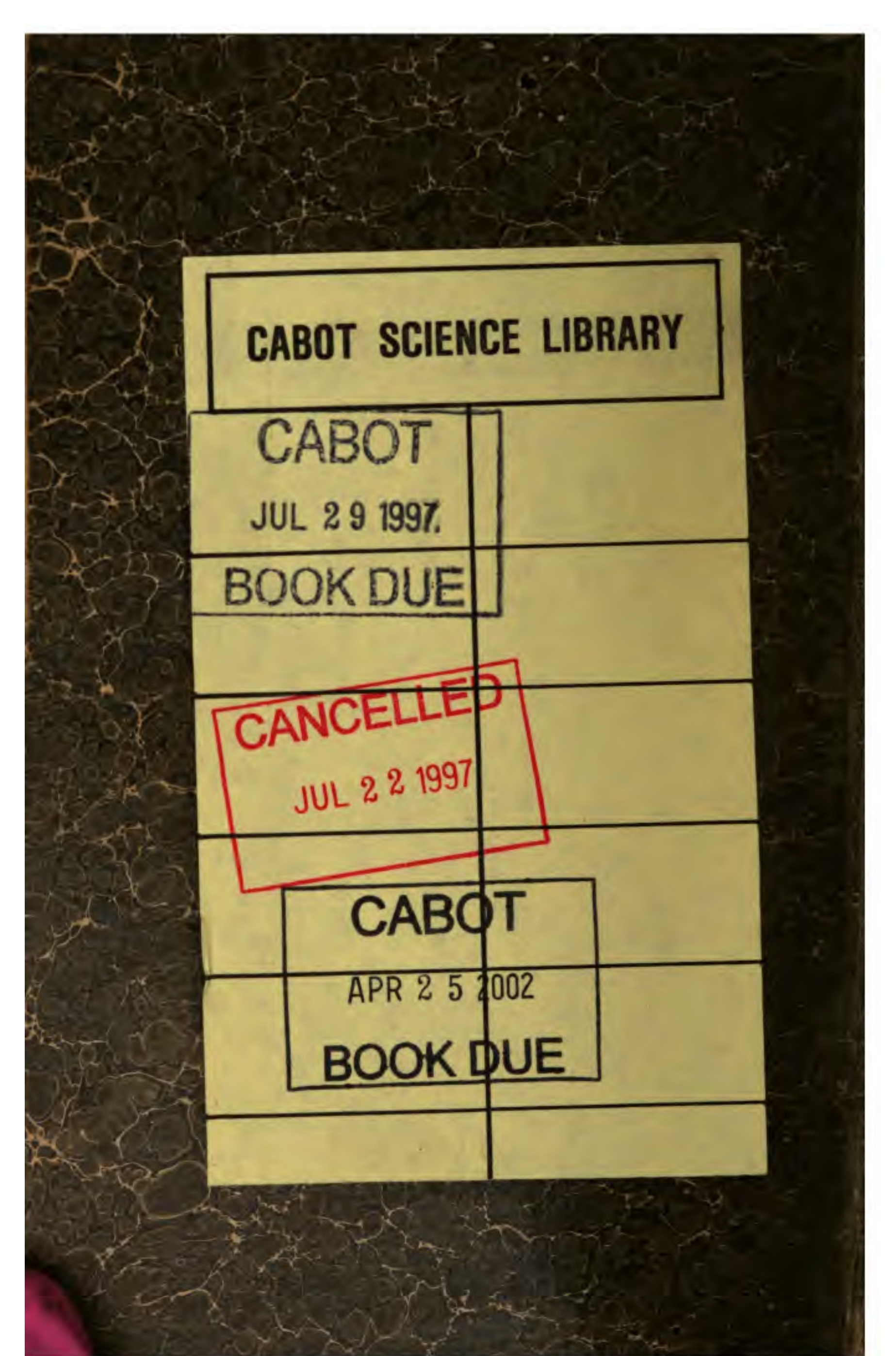
PARIS. — IMPRIMERIE DE J. CLAYE, RUE SAINT-BENOIT, 7.

ERRATUM

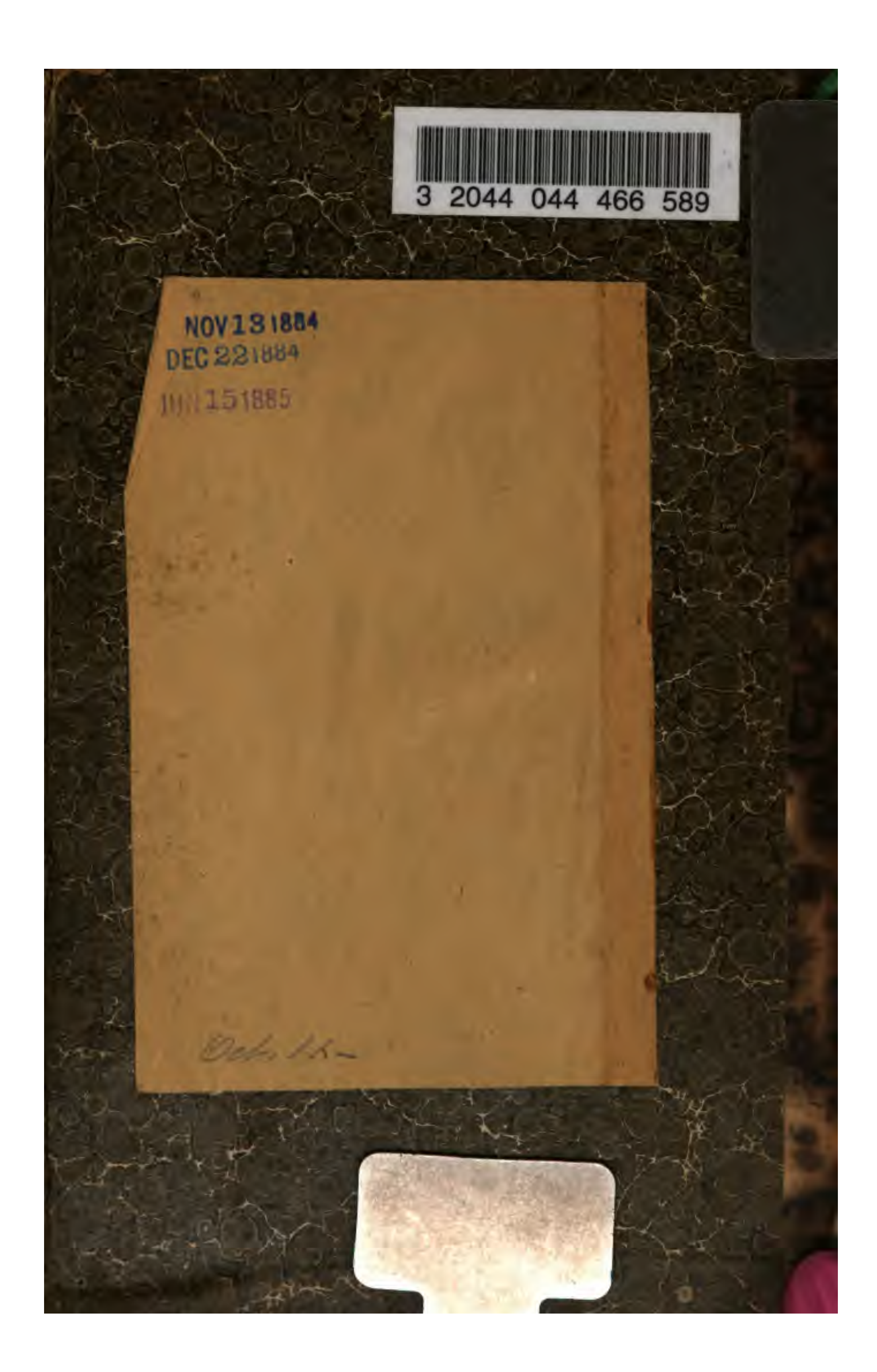
Page 57, ligne 24, *au lieu de* Huyhens, *lisez* Huyghens.







CABOT SCIENCE LIBRARY
CABOT
JUL 29 1997
BOOK DUE
CANCELLED
JUL 22 1997
CABOT
APR 25 2002
BOOK DUE


3 2044 044 466 589
NOV 13 1884
DEC 22 1884
JUN 15 1885


3 2044 044 466 589